



⑳ Aktenzeichen: P 38 11 086.5  
㉔ Anmeldetag: 31. 3. 88  
㉕ Offenlegungstag: 20. 10. 88

DE 3811086 A 1

③① Unionspriorität: ③② ③③ ③①  
03.04.87 JP P 62-80976 14.08.87 JP P 62-201733  
24.09.87 JP P 62-237201

㉗ Anmelder:  
Hitachi, Ltd., Tokio/Tokyo, JP

㉘ Vertreter:  
Hoffmann, W., Dipl.-Phys.; Wallinger, M., Dipl.-Ing.  
Dr.-Ing., Pat.-Anwälte; Kowal-Wolk, T., Dr.-jur.,  
Rechtsanw.; Bardehle, H., Dipl.-Ing., Pat.-Anw.;  
Pagenberg, J., Dr.-jur., Rechtsanw.; Dost, W.,  
Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Altenburg, U., Dipl.-Phys.,  
Pat.-Anwälte; Frohwitter, B., Dipl.-Ing., Rechtsanw.;  
Geißler, B., Dipl.-Phys.Dr.-jur., Pat.- u. Rechtsanw.;  
Kroher, J., Dr., Rechtsanw., 8000 München

㉙ Erfinder:  
Saito, Tadayoshi, Hitachiota, JP; Kawakami, Junzo,  
Mito, JP; Takahashi, Susumu; Suehiro, Testuo,  
Katsuta, JP; Matsumoto, Hiroshi, Ibaraki, JP;  
Tachibana, Kouji, Katsuta, JP

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ PID-Reglersystem

Ein PID-Reglersystem hat einen PID-Regler zur PID-Regelung eines Prozesses, der für ein zu regelndes Objekt steht, und einen automatischen Einsteller, der auf eine Variable reagiert, die sich auf die Beeinflussung des PID-Reglers und der Regelvariablen von dem Prozeß bezieht, um notwendige Ausführungswerte zu erhalten, und der auf der Basis der Ausführungswerte optimale Regelparameter zum Abstimmen der tatsächlichen Regelvariablen auf den Regelbefehlswert erstellt, wobei die optimalen Regelparameter vom automatischen Einsteller zurückgeführt werden zum PID-Regler.

DE 3811086 A 1

## 1. PID-Reglersystem gekennzeichnet durch

- 5 — einen PID-Regler (1) zum Empfangen einer Differenz ( $e$ ) zwischen einem Regelbefehlswert ( $SV$ ) und einer tatsächlichen Regelvariablen ( $PV$ ) eines zu regelnden Objekts und zum Ausgeben einer beeinflussten Variablen ( $MV$ ) an einen Prozeß (2), der für das regelbare Objekt steht, wobei der Prozeß mit der beeinflussten Variablen betrieben wird, um die tatsächliche Regelvariable zu erzeugen, und
- 10 — eine automatische Einstelleinrichtung (3; 3'; 3''), die auf eine Variable ( $SV$  oder  $MV$ ) anspricht, die sich auf die Beeinflussung des PID-Reglers und die Regelvariable von dem Prozeß bezieht, um notwendige Ausführungswerte zu erhalten, und die vorbereitet auf Basis der Ausführungswerte optimale Regelparameter zum Abstimmen der tatsächlichen Regelvariablen auf den Regelbefehlswert erstellt, wobei die optimalen Regelparameter von der automatischen Einstelleinrichtung zu dem PID-Regler zurückgeführt werden.

## 2. PID-Reglersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die automatische Einstelleinrichtung (3; 3') aufweist

- 20 — eine Regelvariablen-Antwortform-Erkennereinrichtung (4; 4') zum Empfangen des Befehlswertes und der tatsächlichen Regelvariablen des regelbaren Objekts und zum Bestimmen einer Vielzahl von Ausführungswerten auf der Basis einer Antwortform der Regelvariablen, die erhalten wird, wenn der Befehlswert geändert wird oder eine äußere Störung angelegt wird,
- 25 — eine Regelparametermodifiziereinrichtung (6; 6') zum qualitativen Abschätzen der Vielzahl von Ausführungswerten und zum Ableiten modifizierter Werte der PID-Regelparameter auf der Basis der Ergebnisse der qualitativen Abschätzung und
- eine Regelungsentscheidereinrichtung (5; 5') zum Betätigen der Regelparametermodifiziereinrichtung, wenn einer aus der Vielzahl von Ausführungswerten nicht jeweils in seinen erlaubten Bereich fällt.

## 3. PID-Reglersystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Regelparametermodifiziereinrichtung eine Vielzahl von Abschätzeinrichtungen zum qualitativen Abschätzen des Betrags von jedem der Vielzahl der Ausführungswerte aufweist und Einstellregeln, die vorher erstellt wurden zum Vorschreiben der Zwischenbeziehung zwischen den qualitativ abgeschätzten, vielzahligen Ausführungswerten angewendet werden, um modifizierte Werte der PID-Regelparameter abzuleiten.

## 4. PID-Reglersystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die vielzahligen Ausführungswerte ein Maß für das Überschwingen und das Dämpfungsverhältnis sind.

## 5. PID-Reglersystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die vielzahligen Ausführungswerte ein Maß für das Überschwingen, das Dämpfungsverhältnis und das Periodenverhältnis sind, das ein Verhältnis zwischen den vorhergehenden und momentanen Werten der Periode definiert.

## 6. PID-Reglersystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die vielzahligen Ausführungswerte ein Maß für das Überschwingen, das Dämpfungsverhältnis und das Anstiegszeitverhältnis sind, das ein Verhältnis zwischen den vorhergehenden und momentanen Werten der Anstiegszeit definiert.

## 7. PID-Reglersystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die vielzahligen Ausführungswerte ein Maß für das Überschwingen, das Dämpfungsverhältnis und das Abstimmzeitverhältnis sind, das ein Verhältnis zwischen den vorhergehenden und momentanen Werten der Abstimmzeit definiert.

## 8. PID-Regler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die automatische Einstelleinrichtung (3'') aufweist,

- 50 — eine Setzeinrichtung (7) zum Einstellen des Prozesses, der für das regelbare Objekt steht, um die Verstärkung, die Totzeit und die Zeitkonstante des Prozesses zu bestimmen,
- eine Proportionalverstärkungs-Berechnungseinrichtung (8), die auf die Verstärkung, die Totzeit und die Zeitkonstante anspricht, erzeugt von der Setzeinrichtung, um die Proportionalverstärkung einzustellen,
- 55 — eine Integrationszeit-Berechnungseinrichtung (9), die auf die Totzeit und die Zeitkonstante anspricht, erzeugt von der Setzeinrichtung, um die Integrationszeit für die Regelung einzustellen, und
- eine Differentiationszeit-Berechnungseinrichtung (10), die auf die Totzeit und Zeitkonstante anspricht, erzeugt von der Setzeinrichtung, um die Differentiationszeit einzustellen.

## 9. PID-Reglersystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Integrationszeit-Berechnungseinrichtung die Integrationszeit bestimmt, indem der Totzeiterm und der Zeitkonstanten-Zeiterm addiert werden, und die Proportionalverstärkungs-Berechnungseinrichtung das Ergebnis der Addition mit dem Produktterm der Verstärkungstotzeit bestimmt, und die Differentiationszeit-Berechnungseinrichtung die Differentiationszeit bestimmt, indem sie den Produktterm der Verstärkungs- und Totzeit durch die Integrationszeit teilt, die sich aus der Addition ergibt.

10. PID-Reglersystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Ausgang  $K_p$  der Proportionalverstärkungs-Berechnungseinrichtung, der Ausgang  $T_i$  der Integrationszeit-Berechnungseinrichtung und der Ausgang  $T_d$  der Differentiationszeit-Berechnungseinrichtung jeweils bestimmt werden durch

$$K_p = \frac{0.315L + T}{1.37K \cdot L}$$

$$T_i = 0.315L + T$$

$$T_D = \frac{0.315L \cdot T + 0.003L^2}{0.315L + T}$$

wobei  $K$  die Verstärkung ist,  $T$  die Totzeit und  $L$  die Zeitkonstante.

#### Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen PID (proportional, integral und differential)-Regler zum Einsatz in einer Regelung und genauer ein PID-Reglersystem, in dem die Abstimmung der PID-Regelparameter automatisch bewirkt werden kann.

Die Erfindung bezieht sich auch auf ein System zum automatischen Einstellen der PID-Regelparameter, was anwendbar bei Prozessen ist, bei denen das Verhältnis von Totzeit und Zeitkonstante groß ist, wobei diese Prozesse z. B. repräsentativ sind für die Kontrolle bzw. Regelung der Verbrennung in Boilern und der Regelung der Temperatur, der pH-Neutralisation und der Flußrate in der chemischen und allgemeinen Industrie.

In der Vergangenheit wurde die Abstimmung der PID-Regelparameter bzw. Kontrollparameter in den PID-Reglern manuell durch den Bediener ausgeführt, der die Änderungen in den Regelvariablen bzw. Kontrollvariablen beobachtet. Das führt zu den Problemen, daß die Einstellarbeit zeitaufwendig wird und Abstimmergebnisse verschieden durch die Individualität des Bedieners beeinflusst werden.

Auf der anderen Seite ist eine Vielzahl von Systemen, basierend auf der Regeltheorie, vorgeschlagen worden, in denen ein Einstelltestsignal an das zu kontrollierende bzw. zu regelnde Objekt angelegt wird, um eine dynamische Kennlinie des regelbaren Objekts einzustellen und Regelparameter wurden auf Basis der Einstellergebnisse auf optimale Werte eingestellt. Bei diesen Vorschlägen jedoch wird erwartet, daß wegen der Fluktuation der Regelvariablen, bewirkt durch die Anwendung des Einstelltestsignals, die Qualität abnimmt oder insbesondere in einer Einrichtung mit starker Nichtlinearität nachteiligerweise anormale Zustände stattfinden. Weiterhin, wenn der Einstelltest nicht jedesmal ausgeführt wird, wenn die dynamische Kennlinie des regelbaren Objekts sich ändert, können die Optimalwerte der Regelparameter nicht erhalten werden, was zu problematischen Bedienungsoperationen führt.

Wie in "Expert Self-tuning Controller", Measurement Technology, Seiten 66—72, Nov., 1986, beschrieben wird, ist auch ein heuristisches Verfahren (Expertenverfahren) bekannt, in dem das Abstimmen der Regelparameter unter Ausnutzung der Form von Antworten der Regelvariablen bewirkt wird. Entsprechend diesem Verfahren wird die tatsächliche Antwortform mit einer Vielzahl von fundamentalen Antwortformen verglichen, die vorher hergestellt wurden, und eine Optimumregel wird aus einer Vielzahl von Einstellregeln für eine angepaßte, fundamentale Antwortform entsprechend der tatsächlichen Antwortform oder seines Einschwingverlaufs ausgewählt, so daß die PID-Regelparameter modifiziert werden können. Bei dieser Methode wird nachteiligerweise erwartet, daß die Anzahl von Einstellregeln erhöht wird, was in eine Erhöhung der Speicherkapazität resultiert.

Z. B. ist, "PID Self-tuning Based on Expert Method", Measurement Technology, Seiten 52—59, Nov., 1986 relevant für diesen Verfahrenstyp.

In der Anlaufphase einer Einrichtung, die regelbare Objekte wie Verfahren und einen PID-Regler zum Regeln der Objekte beinhaltet, ist es allgemeine Praxis, daß die Zeitantwort einer Verfahrensvariablen, die auftritt, wenn eine beeinflusste Variable schrittweise geändert wird, die für ein Eingangssignal zu einem Verfahren steht, in Form einer Totzeitkennlinie und einer ersten Zeitverzögerungskennlinie eingestellt wird und die PID-Regelparameter werden auf optimale Werte eingestellt auf der Basis der Verfahrensverstärkung  $K$ , der Totzeit  $L$  und der Zeitkonstanten  $T$  in diesen Kennlinien. Solch ein Verfahren zur optimalen Einstellung von PID-Regelparametern basierend auf der Sprungantwort enthält ein Ziegler-Nichols(ZN)-Verfahren und ein Chein-Hrones-Reswick(CHR)-Verfahren. Diese Verfahren zeichnen sich durch eine vereinfachte Berechnung aus, aber sind nachteilig in den folgenden Punkten. Als Beispiel, wenn die PID-Regelparameter eingestellt werden nach dem ZN-Verfahren bei einem regelbaren Objekt, das die Totzeit und sekundäre Zeitverzögerungskennlinien hat, ändert sich die Regelantwort, wenn sich der Befehlswert in einem Einheitssprung ändert, wie graphisch in Fig. 1A für  $L/T = 0,14$  und in Fig. 1B für  $L/T = 1,0$  gezeigt wird. Dazu alternativ, wenn die PID-Regelparameter entsprechend des CHR-Verfahrens eingestellt werden, ändert sich die Regelantwort, wenn sich der Befehlswert in einem Einheitssprung ändert, wie graphisch in der Fig. 3A für  $L/T = 0,14$ , in Fig. 3B für  $L/T = 1$  und in Fig. 3C für  $L/T = 5$  dargestellt wird. Somit weicht die Regelantwort in dem ZN-Verfahren von der stabilen Grenze bei  $L/T = 1$  ab und bei dem CHR-Verfahren schwingt die Regelantwort bei  $L/T = 5$ . Daraus folgt, daß es schlüssig ist, daß bei keinem der beiden Verfahren eine exzellente Regelung für große Werte von  $L/T$  realisiert werden kann.

Auf der anderen Seite ist als Vielzweckverfahren zur Einstellung der PID-Regelparameter ein Teilmodellanpassungsverfahren verfügbar, wie z. B. in "Design Method for Control System Based on Partial Knowledge of Controllable Object", Transactions of The Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 5, Nr. 4, Seiten 549/555, August, 1979, beschrieben wird.

Ein Abriß des Teilmodellanpassungsverfahrens wird nachfolgend kurz beschrieben. Eine Vorrichtung zur Implementation des Teilmodellanpassungsverfahrens ist in Blockform schematisch in Fig. 2 gezeigt. Gemäß Fig. 2 bezeichnet das Bezugszeichen 1 einen PID-Regler, 2 einen Prozeß, der für einen zu regelnden Gegenstand

steht, 7 einen Prozeßsetzer zum Setzen einer Übertragungsfunktion  $G_P(S)$  des Prozesses und 11 einen Regelparameterbestimmer zum Bestimmen optimaler Werte von Regelparametern, die in der Übertragungsfunktion  $G_c(S)$  des PID-Reglers beinhaltet sind. Entsprechend des Teilmodellanpassungsverfahrens werden die Regelparameter des PID-Reglers 1 so bestimmt, daß eine Transferfunktion  $W(S)$  des geschlossenen Kreises, die einen Befehlswert  $SV$  und eine Regelvariable  $PV$  enthält, mit einer Übertragungsfunktion  $G_m(s, \sigma)$  eines Bezugsmodells, das eine ideale Antwort der Regelvariablen  $PV$  darstellt, zusammenfällt, wobei  $S$  der Laplace-Operator und  $\sigma$  ein Zeitskalierungskoeffizient ist. Die Übertragungsfunktion  $G_P(S)$  von Prozeß 1, erhalten von dem Prozeßsetzer 7, wird durch die folgende Gleichung angegeben:

$$G_P(S) = \frac{1}{g_0 + g_1 s + g_2 s^2 + g_3 s^3 + \dots} \quad (1)$$

und die Übertragungsfunktion  $G_c(S)$  des PID-Reglers 1 hat die Form von

$$G_c(S) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right) \quad (2.1)$$

$$= \frac{K_P}{T_I \cdot s} (1 + T_I \cdot s + T_I \cdot T_D s^2) \quad (2.2)$$

wobei  $K_P$ ,  $T_I$  und  $T_D$  jeweils Regelparameter sind, die Proportionalverstärkung, Integrationszeit und Differentiationszeit genannt werden.

Dementsprechend wird die Übertragungsfunktion  $W(S)$  des geschlossenen Kreises angegeben durch

$$W(s) = \frac{G_c(s) \cdot G_P(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_P(s)} \quad (3)$$

Die Übertragungsfunktion  $G_m(s, \sigma)$  des Bezugsmodells ist dann gegeben durch

$$G_m(s, \sigma) = \frac{1}{1 + \sigma \cdot s + a_2(\sigma \cdot s)^2 + a_3(\sigma \cdot s)^3 + a_4(\sigma \cdot s)^4} \quad (4)$$

wobei  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  Konstanten sind, die sich auf die Antwortsignalformen beziehen.

Setzt man die Gleichung (3) gleich der Gleichung (4), wird die Übertragungsfunktion  $G_c(s)$  des PID-Reglers vereinfacht zu

$$G_c(s) = \frac{G_m(s, \sigma)}{G_P(s) [1 - G_m(s, \sigma)]} = \frac{g_0 + g_1 s + g_2 s^2 + g_3 s^3 + \dots}{\sigma \cdot s \{1 + a_2 \sigma \cdot s + a_3 (\sigma \cdot s)^2 + a_4 (\sigma \cdot s)^3 + \dots\}} \quad (5)$$

Beim Teilen des Zählers durch den Nenner in Gleichung (5) ergibt sich

$$G_c(s) = \frac{g_0}{\sigma \cdot s} \left[ \left( 1 + \frac{g_1}{g_0} - a_2 \sigma \right) s + \left\{ \frac{g_2}{g_0} - a_2 \frac{g_1}{g_0} \sigma + (a_2^2 - a_3) \sigma^2 \right\} s^2 + \left\{ \frac{g_3}{g_0} - a_2 \frac{g_2}{g_0} \sigma + (a_2^2 - a_3) \frac{g_1}{g_0} \sigma^2 + (2a_2 a_3 - a_2^3 - a_4) \sigma^3 \right\} s^3 + \dots \right] \quad (6)$$

In Anbetracht, daß die Gleichung (1) gleich der Gleichung (2.2) ist, können die folgenden Formeln abgeleitet werden:

$$\frac{K_P}{T_I} = \frac{g_0}{\sigma} \quad (7)$$

$$T_I = \frac{g_1}{g_0} - a^2 \cdot \sigma \quad (8)$$

$$T_i \cdot T_D = \frac{g_2}{g_0} - \alpha^2 \frac{g_1}{g_0} \sigma + (\alpha_2^2 - \alpha_3) \sigma^2 \quad (9)$$

$$0 = \frac{g_3}{g_0} - \alpha^2 \frac{g_2}{g_0} \sigma + (\alpha_2^2 - \alpha_3) \frac{g_1}{g_0} \sigma^2 + (2\alpha_2\alpha_3 - \alpha_2^3 - \alpha_4) \sigma^3 \quad (10)$$

Aus Gleichung (10) wird die positive Minimum-Realwurzel von  $\sigma$  bestimmt, die in Gleichung (8) ersetzt wird, um  $T_i$  zu bestimmen. Die somit bestimmte positive Minimum-Realwurzel und  $T_i$  werden in den Gleichungen (7) und (9) ersetzt, um  $K_p$  bis  $T_D$  zu bestimmen. In Übereinstimmung mit diesem Verfahren ist ein Zusammenfallen der Übertragungsfunktion  $W(s)$  des geschlossenen Kreises mit dem Bezugsmodell  $G_m(s, \sigma)$  von Gleichung (4) bis zu Ausdrücken vierter Ordnung von  $\sigma$  in Gleichung (4) gegeben.

Aufgrund der Tatsache, daß die kubische, algebraische Gleichung nach Gleichung (10) gelöst wird, um  $\sigma$  zu bestimmen, erfordert dieses Verfahren eine aufwendige Berechnung, für die Mikrocomputeroperationen ungeeignet sind.

Die vorliegende Erfindung beabsichtigt, die Probleme des Standes der Technik, wie oben beschrieben, zu lösen und hat zur Aufgabe, ein PID-Reglersystem anzugeben, in dem die Einstellarbeit des Bedieners in einem großen Ausmaß vermindert werden kann, um zu vermeiden, daß Einstellergebnisse unterschiedlich von der Individualität der Bediener beeinflußt werden, wobei die optimale Abstimmung der Regelparameter bewirkt werden kann, ohne ein Setzsignal anzuwenden, das dazu neigt, das regelbare Objekt zu stören, und Änderungen in der dynamischen Kennlinie des regelbaren Objekts können schnell festgestellt werden, ohne Anwendung irgendwelcher manueller Operationen, wodurch immer optimale Regelkennlinien eingehalten werden können.

Eine andere Aufgabe dieser Erfindung ist es, ein PID-Reglersystem anzugeben, das eine exzellente Regelkennlinie erhalten kann, sogar für einen Prozeß, in dem das Verhältnis der Totzeit zur Zeitkonstanten groß ist, und das optimale Werte von PID-Regelparametern entsprechend relativ einfachen Berechnungsformeln bestimmen kann, um sicherzustellen, daß das PID-Reglersystem sogar mit Hilfe von solch einer Berechnungseinheit mit geringem Durchsatz, wie einem Mikrocomputer, betrieben werden kann.

Entsprechend der Erfindung kann die oben stehende erste Aufgabe durch ein PID-Reglersystem ausgeführt werden, das aufweist eine Regelvariablen-Antwortform-Erkennungseinrichtung zum Beobachten einer Regelvariablen-Antwortform, die auftritt, wenn ein Befehlswert sich ändert oder eine äußere Störung angelegt wird, um notwendige Ausführungswerte zu bestimmen, eine Regelparameter-Modifizierungseinrichtung zum qualitativen Abschätzen der Ausführungswerte, um abgeschätzte, modifizierte Werte der PID-Regelparameter abzuleiten durch "fuzzy reasoning" und eine Regelfähigkeits-Entscheidungseinrichtung, um die Regelparameter-Modifizierungseinrichtung zum Arbeiten zu veranlassen, wenn die Ausführungswerte jenseits ihrer erlaubten Bereiche liegen.

Betreffend das Erreichen der zweiten Aufgabe, basierend auf der Beobachtung, daß das gewöhnliche Teilmodellanpassungsverfahren schwierig ist, um die kubische, algebraische Gleichung mit dem Zweck zu lösen, die für die Bestimmung des Zeitskalierungskoeffizienten notwendige Wurzel zu erhalten, ist herausgefunden worden, daß das regelbare Objekt eingestellt auf die Totzeit und primären Zeitverzögerungskennlinien durch eine Zeitverzögerungskennlinie mehrfacher Ordnung angenähert werden kann, mit dem Zweck, daß der Zeitskalierungskoeffizient, der durch ein Gleichmachen der Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises der Regelvariablen für den Befehlswert mit der Übertragungsfunktion des Bezugsmodells bestimmt wird, durch eine lineare Gleichung der Totzeit angenähert werden kann.

Durch den Einsatz der Ergebnisse der Approximation werden die optimalen Werte der PID-Regelparameter durch Funktionen der Verstärkung, der Totzeit und der Zeitkonstanten, die sich auf Prozesse beziehen, dargestellt und werden entsprechend den spezifizierten Gleichungen bestimmt.

Weitere Vorteile, Merkmale und Anwendungsmöglichkeiten der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen in Verbindung mit der Zeichnung. Darin zeigen

Fig. 1A und 1B Graphen, die Beispiele des Standes der Technik zur Regelantwort zeigen, die erhalten wird, wenn das regelbare Objekt mit der Totzeit und sekundären Zeitverzögerungskennlinien geregelt wird, durch ein schrittweises Ändern des Befehlswertes in einem konventionellen PID-Regler, indem PID-Regelparameter bestimmt werden, unter Verwendung des herkömmlichen ZN-Verfahrens, wobei Fig. 1A für  $L/T = 0,14$  und Fig. 1B für  $L/T = 1$  steht;

Fig. 2 ein Blockdiagramm einer Einrichtung des Standes der Technik zur Implementation der Regelung entsprechend des Teilmodellanpassungsverfahrens;

Fig. 3A, 3B und 3C Graphen, die Beispiele des Standes der Technik von der Regelantwort zeigen, die erhalten wird, wenn das regelbare Objekt mit der Totzeit und den zweiten Zeitverzögerungskennlinien geregelt wird, indem der Befehlswert schrittweise in einem herkömmlichen PID-Regler geändert wird, indem PID-Regelparameter bestimmt werden nach dem herkömmlichen CHR-Verfahren, wobei Fig. 3A für  $L/T = 0,14$ , Fig. 3B für  $L/T = 1$  und Fig. 3C für  $L/T = 5$  steht;

Fig. 4 ein Blockdiagramm, das ein PID-Reglersystem entsprechend einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung zeigt;

Fig. 5A und 5B jeweils Graphen, die Anteilsfunktionen zum Abschätzen des Überschwingens und Anteilsfunktionen zum Abschätzen des Dämpfungsverhältnisses zeigen, wobei diese Anteilsfunktionen in der Ausführungsform nach Fig. 4 verwendet werden;

Fig. 6 ein Beispiel der Einstellungsregeln;

Fig. 7 einen Graph, der Anteilsfunktionen für regelparameter-modifizierende Koeffizienten zeigt;

Fig. 8 graphische Darstellungen, die nützlich zum Erklären der Art der bestimmenden regelparameter-modifizierenden Koeffizienten sind;

Fig. 9 ein Flußdiagramm, das den schematischen Ablauf einer automatischen Abstimmungsfunktion zeigt;

Fig. 10 einen Graph, der die Ergebnisse der automatischen Abstimmung entsprechend der Erfindung darstellt;  
 Fig. 11 ein Blockdiagramm, das ein PID-Reglersystem entsprechend einer zweiten Ausführungsform der Erfindung darstellt;

Fig. 12A und 12B jeweils Kurvenverläufe, die die Antwortform der Regelvariablen zeigen, die erhalten wird, wenn sich der Befehlswert schrittweise ändert, und die Antwortform der Regelvariablen, die erhalten wird, wenn eine äußere Störung schrittweise bzw. sprunghaft angelegt wird;

Fig. 13A, 13B und 13C jeweils Kurvenverläufe, die Anteilsfunktionen für ein abgeschätztes Überschwingen, Anteilsfunktionen zum Abschätzen des Dämpfungsverhältnisses und Anteilsfunktionen zum Abschätzen der Zeitdauer bzw. Periode zeigen;

Fig. 14 ein Beispiel der Einstellungsregeln, die für die jeweiligen Typen der Anteilsfunktionen eingesetzt werden;

Fig. 15 einen Kurvenverlauf, der Anteilsfunktionen für regelparameter-modifizierende Koeffizienten zeigt;

Fig. 16 Kurven, die nützlich zum Erklären der Art zum Bestimmen der Regelparameter modifizierenden Koeffizienten sind;

Fig. 17 ein Flußdiagramm, das schematisch den Ablauf einer anderen automatischen Abstimmungsfunktion zeigt;

Fig. 18A einen Kurvenverlauf, der die automatische Abstimmungantwort bei großem Überschwingen und Nachlaufen zeigt, das am Anfang der Regelantwortform auftritt;

Fig. 18B einen Kurvenverlauf, der die automatische Abstimmungantwort beim Überdämpfen, das am Anfang der Regelantwortform auftritt, zeigt;

Fig. 19 ein Blockdiagramm, das ein PID-Reglersystem entsprechend noch einem anderen Ausführungsbeispiel der Erfindung darstellt;

Fig. 20 einen Kurvenverlauf, der zeigt, wie  $L/T$  und  $\delta/T$  sich bei verschiedenen Bezugsmodellen verhalten, wenn PID-Regelparameter nach dem Teilmodellanpassungsverfahren für das regelbare Objekt bestimmt werden, das eine Totzeit und primäre Zeitverzögerungskennlinien hat; und

Fig. 21A, 21B und 21C jeweils Kurvenverläufe, die die Regelantwort zeigen, die erhalten wird, wenn die Totzeit und die sekundären Zeitverzögerungskennlinien unter den Bedingungen  $L/T = 0,14$ ,  $L/T = 1$  und  $L/T = 5$  geregelt werden, indem der Befehlswert schrittweise geändert wird.

Die Erfindung wird jetzt anhand eines Beispiels mit Bezug auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben.

Wie schematisch in einem Blockdiagramm der Fig. 4 gezeigt wird, weist ein PID-Reglersystem entsprechend einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung einen PID-Regler 1 auf, ein Objekt 2, das geregelt wird, und einen automatischen Einsteller 3.

Der PID-Regler 1 führt eine PID-Berechnung einer Regeldifferenz  $e$  auf, die aus einem Vergleich des Befehlswertes  $SV$  mit einer Regelvariablen  $PV$  erhalten wird, und erzeugt ein PID-Berechnungsergebnis, das als beeinflusste Variable  $MV$  dem regelbaren Objekt 2 zugeführt wird. Der automatische Einsteller 3 weist auf einen Regelvariablen-Antwortform-Erkennen 4, einen Regelungsentscheider 5 und einen Regelparametermodifizierer 6. Der Regelparametermodifizierer 6 beinhaltet einen regelparameter-modifizierenden Koeffizienten-Ableiter 6a, einen Einstellungsregelgeber 6b und einen Regelparameter-Einstellwertberechner 6c.

Die einzelnen oben angegebenen Komponenten werden jetzt spezifisch beschrieben. Der Regelvariablen-Antwortform-Erkennen 4 beobachtet ständig oder überwacht ständig den Befehlswert  $SV$  und die Regelvariable  $PV$  und beginnt, eine Regelvariablenantwort zu dem Zeitpunkt zu beobachten, zu dem die Regeldifferenz  $e$  einen vorgegebenen Wert überschreitet, nachdem die Regelvariable  $PV$  zum Befehlswert  $SV$  hingewendet worden ist. Gleichzeitig mit dem Beginn der Beobachtung holt der Erkennen 4 Extremwerte von  $PV$  heraus und beendet die Beobachtung, wenn die Regelvariable  $PV$  auf den Befehlswert  $SV$  abgestimmt ist. Der Erkennen 4 berechnet dann den Betrag des Überschießens bzw. Überschwingens und das Dämpfungsverhältnis auf Basis einer Vielzahl von erhaltenen Extremwerten und einer Änderungsbreite des Befehlswertes  $SV$ .

Kommen Extremwerte der Regelvariablen  $PV$  nicht vor, werden negative Pseudowerte eingestellt. Der Regelungsentscheider 5 bestimmt, daß die Regelparameter optimale Werte sind, wenn das erhaltene Überschwingen bzw. das Dämpfungsverhältnis innerhalb ihrer erlaubten Bereiche fallen, und beendet die Abstimmung. Wenn weder das Überschießen noch das Dämpfungsverhältnis in den erlaubten Bereich fällt, aktiviert der Entscheider 5 den Regelparametermodifizierer 6.

Der regelparameter-modifizierende Koeffizientenableiter 6a, wenn er auf dem "fuzzy reasoning"-Verfahren beruht, wird nachfolgend beschrieben. Um den Betrag des Überschwingens und das Ausmaß des Dämpfungsverhältnisses qualitativ abzuschätzen, werden Anteilsfunktionen, wie in den Fig. 5A und 5B gezeigt wird, definiert. In den Fig. 5A und 5B, sind  $E(i)$ , wobei  $i = 1-5$ , und  $D(i)$ , wobei  $i = 1-3$ , Konstanten zum Vorschreiben der Form der Anteilsfunktion und  $PB$ ,  $ZE$  und  $NB$  sind Namen, die den Anteilsfunktionen mit Hinblick auf ein qualitatives Abschätzen der Größe zugeordnet wurden. Die Namen haben die folgenden Bedeutungen:

$PB$ : Positiv Groß  
 $ZE$ : Null  
 $NB$ : Negativ Groß

In diesen Figuren stellt die Ordinate den Anteilswert  $G$  dar, der für einen qualitativen Grad steht. In Fig. 6 ist ein Beispiel der Einstellungsregeln des Einstellregelgebers 6b für PID-Regelparameter aufgelistet, die von verschiedenen Regelvariablen-Antwortformen beschrieben werden, die unter Verwendung der Anteilsfunktionen hergestellt worden sind.

Die Regel 1 z. B. hat die Bedeutung "wenn  $E = PB$  und  $D = PB$ , dann  $CKP = NB$ ,  $CTD = PB$  und  $CTD = PB$ ", der "wenn-Satz" wird als Konditionalsatz bezeichnet und der "dann-Satz" wird als schlüssiger Satz bezeichnet, wobei  $E$  ein modifizierender Koeffizient für den Betrag des Überschwingens,  $D$  ein modifizierender

Koeffizient für das Dämpfungsverhältnis,  $CKP$  ein modifizierender Koeffizient für die Proportionalverstärkung,  $CTI$  ein modifizierender Koeffizient für die Integrationszeit und  $CTD$  ein modifizierender Koeffizient für die Differentiationszeit ist. Fig. 7 zeigt graphisch Anteilfunktionen, die eingesetzt werden zum Umwandeln der qualitativ bestimmten regelparameter-modifizierenden Koeffizienten in quantitative Werte. In Fig. 7 ist  $CI(i)$ , wobei  $i = 1-6$ , die Konstante zum Vorschreiben der Form der Anteilfunktionen und  $PB$ ,  $ZE$  und  $NB$  sind Namen, die den Anteilfunktionen mit Hinblick auf das qualitative Anzeigen der Größe der regelparameter-modifizierenden Koeffizienten zugeordnet sind und die den in den Fig. 5A und 5B verwendeten Namen entsprechen, wobei die Ordinate den Anteilwert darstellt.

Für die Fälle, wo die Regeln 1 und 2 z. B. angewendet werden, wird nachfolgend die Art des Bestimmens der regelparameter-modifizierenden Koeffizienten beschrieben. Besonders bezogen auf Fig. 8, in der die Art des Bestimmens der modifizierenden Koeffizienten  $CKP$  für die Proportionalverstärkung entsprechend dem fuzzy reasoning-Verfahren dargestellt ist. Der qualitative Grad des Betrags des Überschwingens  $E_o$  und des Dämpfungsverhältnisses  $D_o$ , die von dem Regelvariablen-Antwortform-Erkennen 4 erhalten wird, wird bestimmt, indem jeweils Anteilfunktionen, wie in den Fig. 5A und 5B dargestellt, verwendet werden. In der Regel 1 ist  $E_o$  gleich  $Gep$  und  $D_o$  gleich  $Gdp$  und in der Regel 2 ist  $E_o$  gleich  $Gep$  und  $D_o$  ist  $Gdz$ . Eine Produktsatz-(Minimalwert-)Berechnung wird innerhalb der jeweiligen Regeln ausgeführt, um die Anpassungsfähigkeit jeder Regel zu bestimmen, die  $Dep$  für Regel 1 und  $Gde$  für Regel 2 ist. Demzufolge werden die Anteilfunktionen, die in dem Schlußsatz jeder Regel enthalten sind, durch die Anpassungsfähigkeit jeder Regel gewichtet, wobei die gewichteten Anteilfunktionen einer Summensatz-(Maximalwert-)Berechnung unterzogen werden und der Schwerpunkt bzw. Mittelwert des Ergebnisses der Summensatzberechnung wird als ein Ausgangswert  $CKP_0$  des proportional verstärkungsmodifizierenden Koeffizienten bestimmt. Ausgangswerte des integrationszeitmodifizierenden Koeffizienten  $CTI$  und des differentiationszeitmodifizierenden Koeffizienten  $CTD$  können auf ähnliche Weise bestimmt werden. Der Regelparameter-einstellwertberechner 6C multipliziert die so erhaltenen PID-regelparameter-modifizierenden Koeffizienten mit dem Momentanwert der PID-Regelparameter, um den momentanen Einstellwert zu bestimmen.

Fig. 9 zeigt ein schematisches Flußdiagramm der Prozedur in dem automatischen Einsteller 3. Beim Schritt 10 werden  $SV$  und  $PV$  bei einer vorbestimmten Zeitdauer eingegeben und jedesmal wenn  $SV$  und  $PV$  eingegeben werden, wird über ein Zustandszeichen (status flag), das den Verarbeitungszustand des automatischen Einstellers 3 anzeigt, in Schritt 11 entschieden. Das Zustandszeichen "0" zeigt einen Zustand zum Beobachten oder Überwachen der Regelantwort an und das Zustandszeichen "1" zeigt den Zustand zum Beobachten und Einschätzen der Regelantwort und das Zustandszeichen "2" zeigt einen Zustand zum Berechnen der Regelparameter an. Wenn das Zustandszeichen "0" ist, wird im Schritt 12 bestimmt, ob die Regeldifferenz einen vorgegebenen Wert überschreitet. Wenn die Regeldifferenz den vorgegebenen Wert überschreitet, wird das Zustandszeichen auf "1" im Schritt 13 gesetzt und der Ablauf geht in den Regelantwortüberwachungszustand über. Wenn die Regeldifferenz nicht über den vorgegebenen Wert hinausgeht, wird der regelantwortüberwachende Zustand beibehalten. Wenn das Zustandszeichen zu "1" im Schritt 11 bestimmt wird, werden Extremwerte von  $PV$  in Schritt 14 herausgeholt. Dieser Vorgang wird für jede eingegebene  $PV$  durchgeführt und fortgesetzt bis im Schritt 15 bestimmt wird, daß  $PV$  auf  $SV$  (Abschluß der Beobachtung) abgestimmt ist. Nach Abschluß der Beobachtung werden die Ausführungswerte (Überschwingbetrag und dem Dämpfungsverhältnis) in Schritt 16 bestimmt, indem Ergebnisse der Extremwertbestimmung ausgeführt in Schritt 14 verwendet werden und das Zustandszeichen im Schritt 17 auf "2" gesetzt, wonach die Prozedur in den Regelparameterberechnungszustand übergeht. Der bis jetzt beschriebene Ablauf entspricht dem Betrieb des Regelantwortformerkenners 4.

Wenn in Schritt 11 entschieden wird, daß das Zustandszeichen "2" ist, wird in Schritt 18 bestimmt, ob die beobachtete Regelantwort ein Optimum ist, indem entschieden wird, ob die bestimmten Ausführungswerte in Schritt 16 innerhalb ihrer erlaubten Bereiche fallen. Dieser Ablauf entspricht dem Betrieb des Regelungsentseiders 5. Nur in dem Fall, wo die Regelantwort nicht optimal ist, werden die modifizierenden Koeffizienten für die Regelparameter in Schritt 19 bestimmt und Einstellwerte für die Regelparameter werden in Schritt 20 bestimmt. Die damit erhaltenen Regelparameter-Einstellwerte werden verwendet für die Regelungsberechnung in dem PID-Regler 1. Der Schritt 16 entspricht dem Betrieb des regelparameter-modifizierenden Koeffizientenableiters 6a und des Einstellungsregelgebers 6b und der Schritt 20 entspricht dem Betrieb des Regelparameter-Einstellwertberechners 6c. Wenn entschieden wird, daß die Regelantwort in Schritt 18 optimal ist und der Prozeß in Schritt 20 endet, wird das Zustandszeichen auf "0" in Schritt 21 zurückgesetzt und die Prozedur kehrt zurück in den Regelantwortüberwachungszustand.

Das PID-Reglersystem dieser Ausführungsform wird für ein regelbares Objekt betrieben, das die sekundären Zeitverzögerungs- und Totzeitkennlinien hat, und Ergebnisse zeigt, wie graphisch in Fig. 10 dargestellt ist. Insbesondere die Zeitantwort der Regelvariablen  $PV$ , die erhalten wird, wenn der Befehlswert  $SV$  geändert wird, ist in Fig. 10 dargestellt. Zu der Zeit, wenn der  $SV$  sich schrittweise am Anfang ändert, folgt die anfängliche Regelantwort von  $PV$  der Änderung von  $SV$  mit einem Überschwingbetrag  $E = 50\%$  und das Dämpfungsverhältnis  $D$  beträgt 0,6, wonach die Ausführungswerte (Überschwingbetrag und Dämpfungsverhältnis), erhalten von den Beobachtungsergebnissen, was einem zweimaligen Vorgang bzw. einer Schrittländerung des  $SV$  entspricht, innerhalb der vorgegebenen, erlaubten Bereiche der Ausführungswerte fallen können, wodurch ein Erreichen der optimalen Abstimmung angezeigt wird, und deshalb ist die Abstimmung beim dritten Schritt vollständig.

Wie vorher beschrieben, kann das automatische Abstimmen der Regelparameter erreicht werden, indem eine kleine Anzahl von Einstellregeln verwendet wird.

Obwohl alle Anteilfunktionen von triangulärer Form nur für Darstellungszwecke sind, sind sie nicht darauf beschränkt und können mit einer quadratischen Kurve oder einer exponentiellen Kurve, ohne das Essentielle der Erfindung zu verändern, realisiert werden. Weiterhin kann die Anzahl der Anteilfunktionen je nach Wunsch

gesetzt werden. Mit Bezug auf die Fig. 11 bis 18A und Fig. 18B, wird ein PID-Reglersystem entsprechend einer zweiten Ausführungsform der Erfindung beschrieben. Diese Ausführungsform unterscheidet sich von der ersten Ausführungsform nach den Fig. 4 bis 10 dadurch, daß zusätzlich zu dem Überschwingen und dem Dämpfungsverhältnis das Periodenverhältnis als Regelparameter eingesetzt wird. Da die Blockkonfigurationsform nach Fig. 11 im wesentlichen identisch zu der von Fig. 4 ist, die die erste Ausführungsform betrifft, mit der einzigen Ausnahme, daß die erstere so modifiziert wird, daß das Periodenverhältnis als zusätzlicher Beobachtungsparameter behandelt wird. Die Bezugszeichen in Fig. 4 werden mit einem Strich versehen, um Blöcke oder Elemente in Fig. 11 zu bezeichnen, die denen in Fig. 4 entsprechen. Die Beobachtung und Regelung wird tatsächlich in einer Weise ausgeführt, wie nachfolgend beschrieben wird.

Ein Regelvariabel-Antwortform-Erkennenner 4' überwacht ständig den Befehlswert  $SV$  und die Regelvariable  $PV$  und beginnt, eine Regelvariablen-Antwort zu beobachten, bei der die Regeldifferenz  $e$  einen vorgegebenen Wert überschreitet, nachdem die Regelvariable  $PV$  auf den Befehlswert  $SV$  eingestellt worden ist. Gleichzeitig mit dem Beginn der Beobachtung holt der Erkennenner 4' Extremwerte der Regelvariablen  $PV$  heraus und beendet die Beobachtung, wenn die Regelvariable auf den Befehlswert  $SV$  abgestimmt ist. Der Erkennenner 4' berechnet dann den Betrag des Überschwingens, das Dämpfungsverhältnis und das Periodenverhältnis auf der Basis einer Vielzahl von erhaltenen Extremwerten und Zeiten, bei denen die Extremwerte auftreten. Die Art des Bestimmens dieser Regelparameter wird nachfolgend mit Bezug auf die Figuren 12A und 12B beschrieben. Fig. 12A zeigt insbesondere ein Beispiel der Zeitantwort der Regelvariablen  $PV$ , die erhalten wird, wenn der Befehlswert  $SV$  schrittweise von  $Y_0$  zu  $Y_1$  zum Zeitpunkt  $t_0$  sich ändert, und zeigt an, daß die Extremwerte  $X_1$ ,  $X_2$  und  $X_3$  zu den Zeitpunkten  $t_1$ ,  $t_2$  und  $t_3$  auftreten und das Abstimmen zu einem Zeitpunkt  $t_4$  abgeschlossen ist. Der Überschwingbetrag  $E$ , das Dämpfungsverhältnis  $D$  und die Periode  $T$  sind gegeben durch

$$\begin{aligned} R &= (X_1 - Y_1)/(Y_1 - Y_0) \\ D &= (X_3 - Y_2)/(X_1 - X_2) \\ T &= t_3 - t_1. \end{aligned}$$

Demnach, unter der Voraussetzung, daß der vorhergehende Wert der Periode =  $T_1$  ist, wird das Periodenverhältnis  $R$  ausgedrückt durch

$$R = T_1/T.$$

Die Fig. 12B stellt insbesondere ein Beispiel der Zeitantwort der Regelvariablen  $PV$  dar, die erhalten wird, wenn eine äußere Störung auf den Eingang des regelbaren Objekts mit dem Befehlswert gehalten auf  $Y_0$  angelegt wird, und zeigt an, daß die Extremwerte  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  und  $X_4$  zu den Zeitpunkten  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  und  $t_4$  auftreten und die Abstimmung zum Zeitpunkt  $t_5$  abgeschlossen ist. Der Überschwingbetrag  $E$ , das Dämpfungsverhältnis  $D$  und die Periode  $T$  sind gegeben durch

$$\begin{aligned} E &= (Y_0 - Y_2)/(X_1 - Y_0) \\ D &= (X_3 - X_4)/(X_3 - X_2) \\ T &= t_4 - t_2. \end{aligned}$$

Weiter, wenn kein Extremwert auftritt in der Regelvariablen-Antwortform, wenn der Befehlswert sich ändert, oder wenn kein Extremwert ein zweitesmal auftritt in der Regelvariablen-Antwortform, wenn die äußere Störung angelegt ist, wird das Überschwingen auf einen negativen Wert und die Periode auf Null gesetzt. Wenn nur ein Extremwert auftritt in der Regelvariablen-Antwortform als Antwort auf eine Änderung des Befehlswertes oder wenn nur zwei Extremwerte in der Regelvariablen-Antwortform als Antwort auf das Anlegen der äußeren Störung auftreten, wird der Zeitunterschied mit Bezug auf die Abstimmzeit als Periode verwendet.

Ein Regelungsentscheider 5' bestimmt, daß die Regelparameter optimale Werte sind, wenn das erhaltene Überschwingen und das Dämpfungsverhältnis jeweils in ihre erlaubten Bereiche fallen und beendet die Abstimmung. Wenn weder das Überschwingen noch das Dämpfungsverhältnis in den erlaubten Bereich fällt, aktiviert der Entscheider 5' einen Regelparametermodifizierer 6'. Ein regelparameter-modifizierender Koeffizientenableiter 6a', der auf dem fuzzy reasoning-Verfahren beruht, wird nachfolgend beschrieben. Um den Betrag des Überschwingens und die Größe des Dämpfungsverhältnisses und des Periodenverhältnisses qualitativ abzuschätzen, werden Anteilfunktionen, wie in den Fig. 13A, 13B und 13C gezeigt, definiert. In den Fig. 13A bis 13C sind  $E(i)$ , wobei  $i = 1-5$ , und  $D(i)$ , wobei  $i = 1-3$ , und  $R(i)$ , wobei  $i = 1-3$ , Konstanten zum Vorschreiben der Form der Anteilfunktion und  $PB$ ,  $PM$ ,  $ZE$  und  $NB$  sind Namen, die den Anteilfunktionen mit Hinsicht auf ein qualitatives Abschätzen der Größe zugeordnet sind. Wie im Fall der ersten Ausführungsform haben die Namen die folgenden Bedeutungen:

$PB$ : Positiv Groß  
 $PM$ : Positiv Mittel  
 $ZE$ : Null  
 $NB$ : Negativ Groß

In diesen Figuren stellt die Ordinate den Anteilswert  $G$  dar, der für den qualitativen Grad steht. Aufgelistet ist in Fig. 14 ein Beispiel für Einstellungsregeln eines Einstellungsregelgebers 6b' für PID-Regelparameter, die vorgeschrieben werden von verschiedenen Regelvariablen-Antwortformen, die unter der Verwendung der Anteilfunktionen hergestellt werden. Die Regel 2 z. B. hat die Bedeutung "wenn  $E = PB$ ,  $D = PM$  und  $R = PR$ ,



dann  $CKP = NR$ ,  $CTI = NB$  und  $CTD = ZE$ , der "wenn-Satz" wird als Konditionalsatz bezeichnet und der "dann-Satz" wird als Schlußsatz bezeichnet, wobei  $E$  ein modifizierender Koeffizient für den Überschwingbetrag,  $D$  ein modifizierender Koeffizient für das Dämpfungsverhältnis,  $R$  ein modifizierender Koeffizient für das Periodenverhältnis,  $CKP$  ein modifizierender Koeffizient für die Proportionalverstärkung,  $CTI$  ein modifizierender Koeffizient für die Integrationszeit und  $CTD$  ein modifizierender Koeffizient für die Differentiationszeit ist. Fig. 15 zeigt graphisch Anteilsfunktionen, die verwendet werden, um die qualitativ bestimmten regelparameter-modifizierenden Koeffizienten in quantitative Werte umzuwandeln. In Fig. 15 ist  $Q(i)$ , wobei  $i = 1-5$ , eine Konstante zum Vorschreiben der Form der Anteilsfunktionen und  $PB$ ,  $ZE$  und  $NB$  sind Namen, die mit Hinsicht auf die qualitativ anzeigende Größe der regelparameter-modifizierenden Koeffizienten den Anteilfunktionen zugeordnet sind, und die den Namen, verwendet in den Fig. 13A, 13B und 13C, entsprechen und die Ordinate repräsentiert den Anteilwert.

Für den Fall, daß die Regeln 2 und 3 z. B. angewendet werden, wird die Art des Bestimmens der regelparameter-modifizierenden Koeffizienten nachfolgend beschrieben. Mit Bezug insbesondere auf Fig. 16, in der die Art des Bestimmens des modifizierenden Koeffizienten  $CKP$  für die Proportionalverstärkung entsprechend des fuzzy reasoning-Verfahrens dargestellt wird. Der qualitative Grad des Überschwingbetrages  $Eo$ , des Dämpfungsverhältnisses  $Do$  und des Periodenverhältnisses  $Ro$ , die von dem Regelvariablen-Formerkennner 4' erhalten werden, wird mit Einsatz der jeweiligen Anteilsfunktionen, wie in den Fig. 13A, 13B und 13C gezeigt wird, bestimmt. In der Regel 2 ist  $Eo$  Gep,  $Do$  Gdm und  $Ro$  Grp und in der Regel 3 ist  $Eo$  Gep,  $Do$  Gdm und  $Ro$  Grz. Eine Produktsatz(Minimalwert)berechnung wird innerhalb der jeweiligen Regeln ausgeführt, um die Anpaßbarkeit jeder Regel zu bestimmen, die Grp für Regel 2 und Grz für Regel 3 ist. Demnach werden die im Schlußsatz enthaltenen Anteilsfunktionen jeder Regel gewichtet durch die Anpaßbarkeit jeder Regel und die gewichteten Anteilsfunktionen werden einer Summensatz(Maximalwert)berechnung unterzogen und der Mittelwert des Summensatzberechnungsergebnisses wird als ein Ausgangswert  $KP0$  des proportionalverstärkungsmodifizierenden Koeffizienten bestimmt. Ausgangswerte des integrationszeitmodifizierenden Koeffizienten  $CTI$  und des differentiationszeitmodifizierenden Koeffizienten  $CTD$  können auf ähnliche Weise bestimmt werden.

Ein Regelparameter-Einstellwert-Berechner 6' multipliziert den so erhaltenen PID-Regelparameter-modifizierenden Koeffizienten mit dem Momentanwert des PID-Regelparameters, um einen Momentan-Einstellwert zu bestimmen.

Fig. 17 zeigt ein schematisches Flußdiagramm der Prozedur in dem automatischen Einsteller 3'. Beim Schritt 10' werden  $SV$  und  $PV$  bei einer vorgegebenen Periode eingegeben und jedesmal, wenn  $SV$  und  $PV$  eingegeben werden, wird über ein Zustandszeichen, das den Prozeßzustand des automatischen Einstellers 3' angibt, in Schritt 11' entschieden. Das Zustandszeichen "0" zeigt einen Zustand zum Beobachten oder Überwachen der Regelantwort an, das Zustandszeichen "1" zeigt einen Status zum Beobachten und Abschätzen der Regelantwort und das Zustandszeichen "2" zeigt einen Status zum Berechnen der Regelparameter an. Wenn das Zustandszeichen "0" ist, wird in Schritt 12' entschieden, ob die Regeldifferenz einen vorgegebenen Wert überschreitet. Wenn die Regeldifferenz den vorgegebenen Wert überschreitet, wird das Zustandszeichen in Schritt 13' auf "1" gesetzt und die Prozedur geht über in den Regelantwortbeobachtungszustand. Wenn die Regeldifferenz nicht über den vorbestimmten Wert hinausgeht, wird der Regelantwortüberwachungszustand beibehalten. Wenn das Zustandszeichen in Schritt 11' als "1" bestimmt wird, werden Extremwerte von  $PV$  in Schritt 14' herausgeholt. Dieser Ablauf ist für jedes eingegebene  $PV$  gegeben und wird fortgesetzt, bis in Schritt 15' bestimmt wird, daß  $PV$  auf  $SV$  (Abschluß der Beobachtung) abgestimmt ist. Nach dem Abschluß der Beobachtung werden Ausführungswerte (Überschwingbetrag und Dämpfungsverhältnis) in Schritt 16' bestimmt, in dem Ergebnisse der Extremwertgewinnung, ausgeführt in Schritt 14', verwendet werden, und das Zustandszeichen wird im Schritt 17' auf "2" gesetzt und die Prozedur geht über in den Regelparameterberechnungszustand. Der Verarbeitungsfluß, der bis jetzt beschrieben worden ist, entspricht dem Betrieb des Regelantwort-Formerkenners 4'.

Wenn in Schritt 11' entschieden worden ist, daß das Zustandszeichen "2" ist, wird im Schritt 18' bestimmt, ob die beobachtete Regelantwort ein Optimum ist, indem die Entscheidung verwendet wird, ob die Ausführungswerte, die im Schritt 16' bestimmt worden sind, in ihre erlaubten Bereiche fallen. Dieser Vorgang entspricht dem Betrieb des Regelungsentscheiders 5'. Nur in dem Fall, wenn die Regelantwort nicht optimal ist, werden im Schritt 19' die modifizierenden Koeffizienten für die Regelparameter bestimmt und Einstellwerte für die Regelparameter werden in Schritt 20' bestimmt. Die damit erhaltenen Regelparameter-Einstellwerte werden verwendet für die Regelungsberechnung in dem PID-Regler 1. Der Schritt 16' entspricht dem Betrieb des regelparameter-modifizierenden Koeffizientenableiters 6a' und des Einstellungsregelgebers 6b' und der Schritt 20' entspricht dem Betrieb des Regelparameter-Einstellwert-Berechners 6c'. Wenn in Schritt 18' entschieden wird, daß die Regelantwort optimal ist und der Prozeß in Schritt 20' endet, wird das Zustandszeichen in Schritt 21' auf "0" zurückgesetzt und die Prozedur kehrt zu dem Regelantwortüberwachungszustand zurück. Das PID-Reglersystem dieser Ausführungsform wird für das regelbare Objekt betrieben, das die sekundären Zeitverzögerungs- und Totzeitkennlinien hat, die die in den Fig. 18A und 18B graphisch dargestellten angegebenen Ergebnisse zeigen. Insbesondere die Zeitantwort der Regelvariablen  $PV$ , die erhalten wird, wenn der Befehlswert  $SV$  geändert wird, wird in Fig. 18A gezeigt, wobei ein Moment gezeigt wird, in dem der Überschwingbetrag  $E$  für die anfängliche Regelantwort 50% beträgt und das Dämpfungsverhältnis  $D$  0.6 ist, und Fig. 18B einen Moment anzeigt, in dem die anfängliche Regelantwort sich im Überdämpfungszustand befindet. Es wird hervorgehoben, daß in jedem der beiden Beispiele die wesentliche Optimumabstimmung durch einen zweimaligen Vorgang bzw. Schritt erreicht werden kann.

Wie oben beschrieben, kann entsprechend dieser zweiten Ausführungsform der Erfindung nicht nur das automatische Abstimmen der Regelparameter erreicht werden, indem eine kleine Anzahl von Einstellregeln verwendet wird, sondern das Abstimmen kann auch bei einer schnellen Antwort erhalten werden, indem die Regelvariable auf Basis des Periodenverhältnisses abgeschätzt wird. Der Regelvariablen-Antwortform-Erken-

ner kann auch als vierten Ausführungswert eine Regelvariable verwenden, die der Anstiegszeit der vorher beschriebenen Regelvariablen zugeordnet ist, dem Verhältnis zwischen dem vorhergehenden und momentanen Werten der Auftretszeit des erstauftretenden Extremwerts oder dem Verhältnis zwischen dem vorherigen und den momentanen Werten der Abstimmzeit der Regelvariablen. Der Regelparametermodifizierer 6' verwendet die Anteilsfunktionen einer triangulären Form, aber die Form der Anteilsfunktionen ist nicht beschränkt darauf und kann eine quadratische Kurve oder eine exponentielle Kurve sein, ohne daß das Wesentliche der Erfindung verändert wird. Weiterhin kann die Anzahl der Anteilsfunktionen je nach Wunsch gesetzt werden.

Gemäß Fig. 19 und den anderen Figuren wird nachfolgend ein PID-Reglersystem entsprechend noch einer anderen Ausführungsform der Erfindung beschrieben. Wie schematisch in einem Diagramm in Fig. 19 gezeigt wird, hat das PID-Reglersystem dieser Ausführungsform einen PID-Regler 1, einen Prozeß 2, der für ein zu regelndes Objekt steht, und einen automatischen Einsteller 3", der einen Prozeßsetzer 7, einen Proportionalverstärkungsberechner 8, einen Integrationszeitberechner 9 und einen Differentiationszeitberechner 10 beinhaltet.

Diese Ausführungsform nach Fig. 19 ist besonders geeignet zum Setzen von Regelparametern des PID-Reglers 1 auf optimale Werte bei der Betriebsaufnahme einer Einrichtung. Der Prozeßsetzer 7 setzt die dynamische Kennlinie des Prozesses 2 in Form der Totzeit/primären Zeitverzögerungskennlinie fest und bestimmt die Verstärkung  $K$ , die Totzeit  $L$  und die Zeitkonstante  $T$  des Prozesses aus der Totzeit und den primären Zeitverzögerungskennlinien. Der Proportionalverstärkungsberechner 8 bestimmt die Proportionalverstärkung  $K_p$  als eine Funktion der Verstärkung  $K$ , der Totzeit  $L$  und der Zeitkonstanten  $T$  des Prozesses, die erhalten werden von dem Prozeßsetzer 7, und der Integrationszeitberechner 9 bestimmt die Integrationszeit  $T_i$  als eine Funktion der Totzeit  $L$  und der Zeitkonstanten, die erhalten werden von dem Prozeßsetzer 7, und der Differentiationszeitberechner 10 bestimmt die Differentiationszeit  $T_D$  als eine Funktion der Totzeit  $L$  und der Zeitkonstanten  $T$ , die vom Prozeßsetzer 7 erhalten werden.

Die Berechner 8, 9 und 10 machen die vorliegende Ausführungsform aus und arbeiten zur Berechnung auf Basis der folgenden Theorie.

Die Totzeit/primäre Zeitverzögerungskennlinie  $G_p(s)$ , gesetzt von dem Prozeßsetzer 7, ist gegeben durch

$$G_p(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{1 + T \cdot s} \quad (11)$$

Die Totzeitübertragungsfunktion der Gleichung (11) kann entwickelt und vereinfacht werden mit der Maclaurin's Entwicklung zu

$$G_p(s) = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{L+T}{K} s + \frac{L^2/2+LT}{K} s^2 + \frac{L^3/6+L^2T/2}{K} s^3 + \dots} \quad (12)$$

Bei Anwendung des Teilmodellanpassungsverfahrens auf die dynamische Prozeßkennlinie von Gleichung (12) ergeben sich die folgenden Formeln aus den Gleichungen (7) bis (10):

$$\frac{K_p}{T_i} = \frac{1}{k \cdot \sigma} \quad (13)$$

$$T_i = L + T - \alpha_2 \sigma \quad (14)$$

$$T_i \cdot T_D = \frac{L^2}{2} + LT - \alpha_2 (L + T) \sigma + (\alpha_1^2 - \alpha_3) \sigma^2 \quad (15)$$

$$0 = \frac{L_3}{6} + \frac{L_2}{2} T - \alpha_2 \left( \frac{L^2}{2} + LT \right) \sigma + (\alpha_1^2 - \alpha_3) (L + T) \sigma^2 + (2\alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1^3 - \alpha_4) \sigma^3 \quad (16)$$

Weiter, wenn es keine positive reale Wurzel von  $\sigma$  in der Gleichung (16) gibt, kann das Teilmodellanpassungsverfahren nicht die Befehlsregelantwort, angegeben durch Gleichung (4), ausführen.

Dann wird die Beziehung zwischen dem Zeitverhältnis  $L/T$  und der Zeitkonstanten und dem Zeitskalierungskoeffizientenverhältnis  $\sigma/T$  überprüft, indem verschiedene Bezugsmodelle für die Parameter verwendet werden, um Ergebnisse, wie graphisch in Fig. 20 illustriert, zu erhalten. Die Übertragungsfunktionen der Bezugsmodelle, die bei der Prüfung eingesetzt werden sind gegeben wie folgt:

(1) Kiramori Modell

$$Gm(s \cdot \sigma) = \frac{1}{1 + \sigma s + 0.5(\sigma s)^2 + 0.15(\sigma s)^3 + 0.03(\sigma s)^4} \quad (17)$$

(2) Butter worth Modell

$$Gm(s \cdot \sigma) = \frac{1}{1 + \sigma s + 0.503(\sigma s)^2 + 0.1479(\sigma s)^3 + 0.02188(\sigma s)^4} \quad (18)$$

(3) Binomial Modell

$$Gm(s \cdot \sigma) = \frac{1}{1 + \sigma s + 0.375(\sigma s)^2 + 0.0625(\sigma s)^3 + 0.003906(\sigma s)^4} \quad (19)$$

(4) ITAE Minimum Modell

$$Gm(s \cdot \sigma) = \frac{1}{1 + \sigma s + 0.4664(\sigma s)^2 + 0.1067(\sigma s)^3 + 0.01882(\sigma s)^4} \quad (20)$$

Die Variable  $\sigma$  entspricht der Anstiegszeit der Regelantwort und vernünftigerweise wird sie ansteigen wenn  $L$  ansteigt. Beim Studieren von Fig. 20 wird somit klar, daß für das Kitamori Modell, wenn es als Bezugsmodell eingesetzt wird, vernünftige Werte für  $\sigma/T$  erhalten werden können über einen weiten Bereich von  $L/T$  von 0 bis 10. Dieses  $\sigma/T$  ist dann angenähert durch

$$\frac{\sigma}{T} = 1.37 \cdot \frac{L}{T} \quad (21)$$

Aus der Gleichung (21) ergibt sich der Zeitskalierungskoeffizient  $\sigma$  zu

$$\sigma = 1.37 \cdot L \quad (22)$$

Dann kann durch ein Einsetzen der Gleichung (22) in die Gleichungen (13) und (15) die Proportionalverstärkung  $K_p$ , die Integrationszeit  $T_i$  und die Differentiationszeit  $T_D$  wie folgend bestimmt werden:

$$K_p = \frac{0.215L + T}{1.37K \cdot L} \quad (23)$$

$$T_i = 0.315L + T \quad (24)$$

$$T_D = \frac{0.315L \cdot T + 0.003L^2}{0.315L + T} \quad (25)$$

Deshalb berechnet der Proportionalverstärkungsberechner 8 Gleichung (23), um einen optimalen Wert  $K_p$  der Proportionalverstärkung auf der Basis von  $K$ ,  $L$  und  $T$  zu bestimmen, und der Integrationszeitberechner 9 berechnet Gleichung (24), um den optimalen Wert  $T_i$  der Integrationszeit zu bestimmen, und der Differentiationszeitberechner 10 berechnet Gleichung (25), um den optimalen Wert  $T_D$  der Differentiationszeit zu bestimmen, wodurch sichergestellt ist, daß die Proportionalverstärkung  $K_p$ , die Integrationszeit  $T_i$  und die Differentiationszeit  $T_D$  des PID-Reglers 1 jeweils gesetzt und modifiziert werden können.

In Gleichung (25) kann der Ausdruck von  $L^2$  vernachlässigt werden, wenn  $L$  kleiner als  $T$  ist, und die Differentiationszeit  $T_D$  kann berechnet werden entsprechend

$$T_D = \frac{0.315L \cdot T}{0.315L + T} \quad (26)$$

5 Mit der Ausführungsform von Fig. 19 wird die Regelantwort des Prozesses mit der Totzeit und sekundären Zeitverzögerungskennlinien, wie in dem Fall nach den Fig. 1A, 1B, 3A, 3B und 3C, überprüft, indem der Befehlswert in einem Einheitsschritt geändert wird, um Ergebnisse zu erhalten, wie sie graphisch in der Fig. 21A für  $L/T = 0,14$ , in der Fig. 21B für  $L/T = 1$  und in der Fig. 21C für  $L/T = 5$  dargestellt sind, wobei gezeigt wird, daß sogar für große  $L/T$  eine exzellente Regelkennlinie erhalten werden kann.

10 Obwohl alle der vorhergehenden Ausführungsformen in Form von Hardware für die Klarheit der Erklärung beschrieben worden sind, können sie offensichtlich mit Software mit der Hilfe eines Computers in einer ähnlichen Weise realisiert werden.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

3811086

FIG. 1A

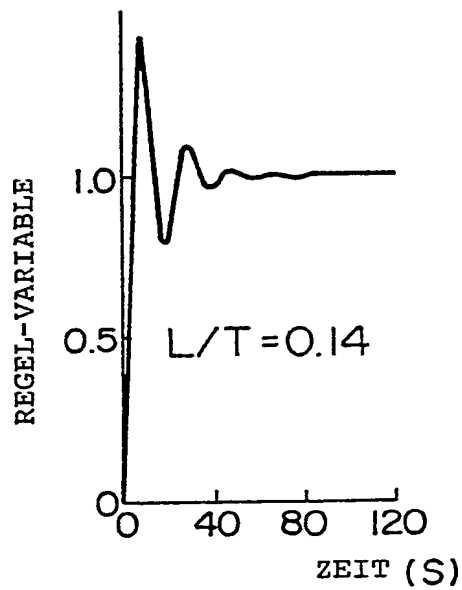


FIG. 1B

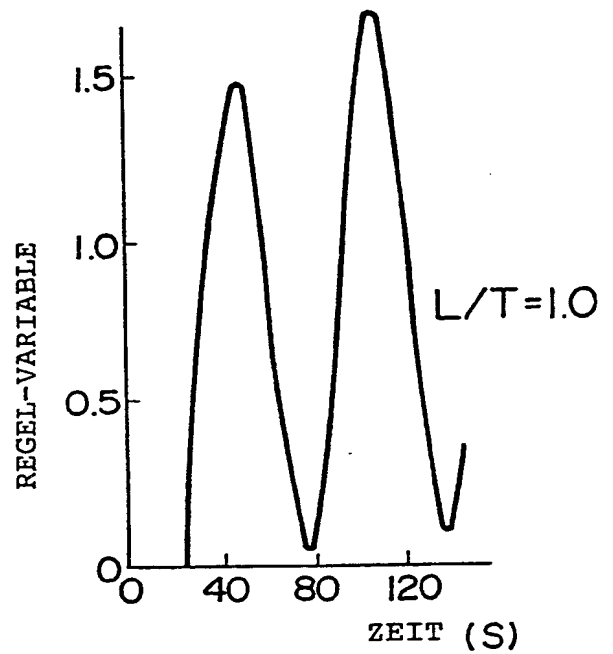
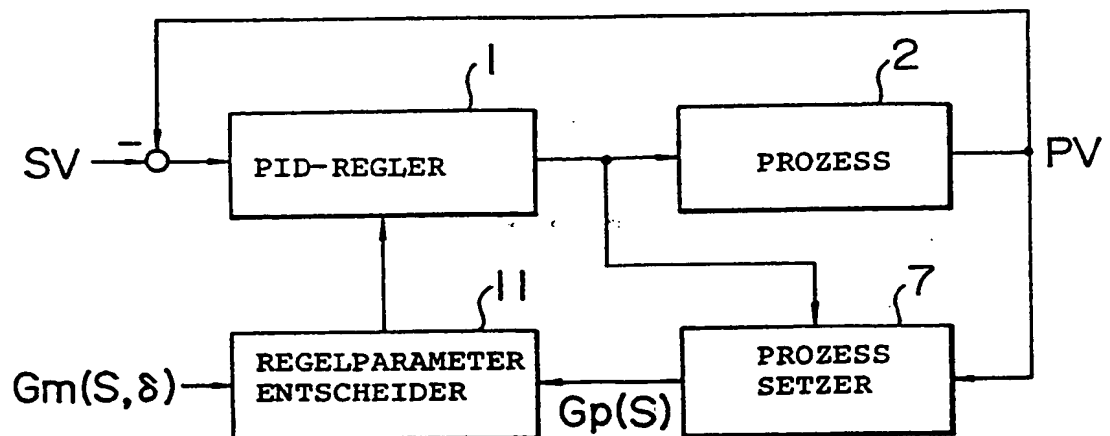


FIG. 2

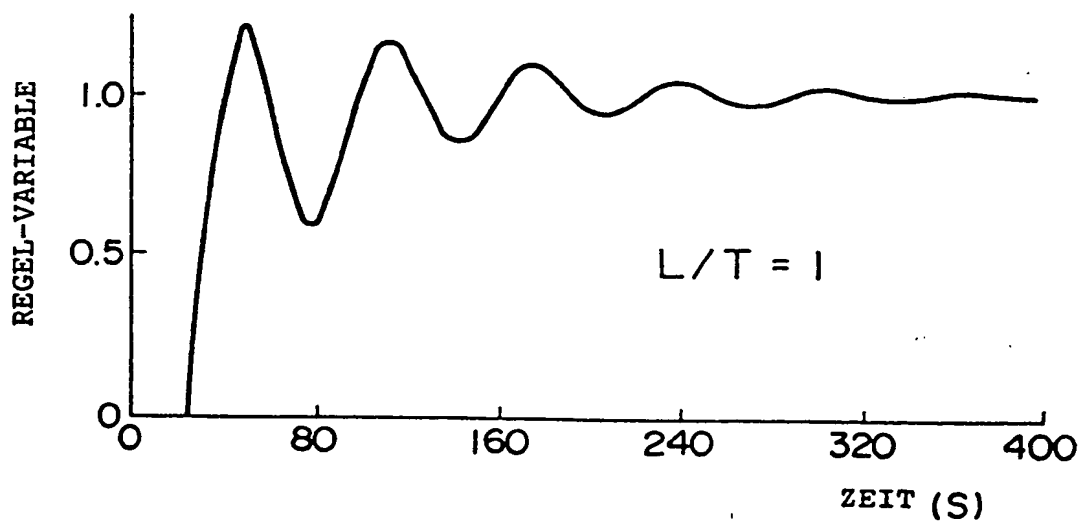


3811086

FIG. 3A



FIG. 3B



3811086

FIG. 3C

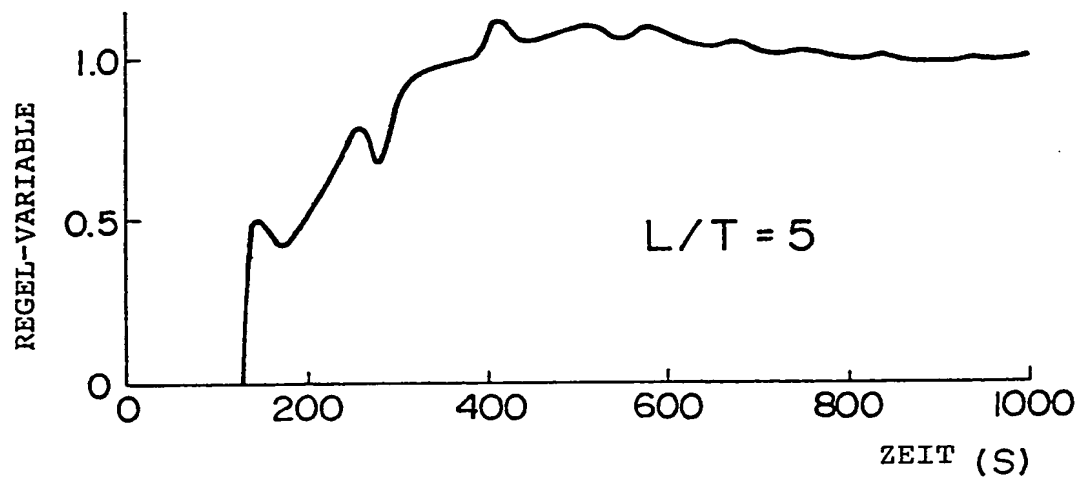
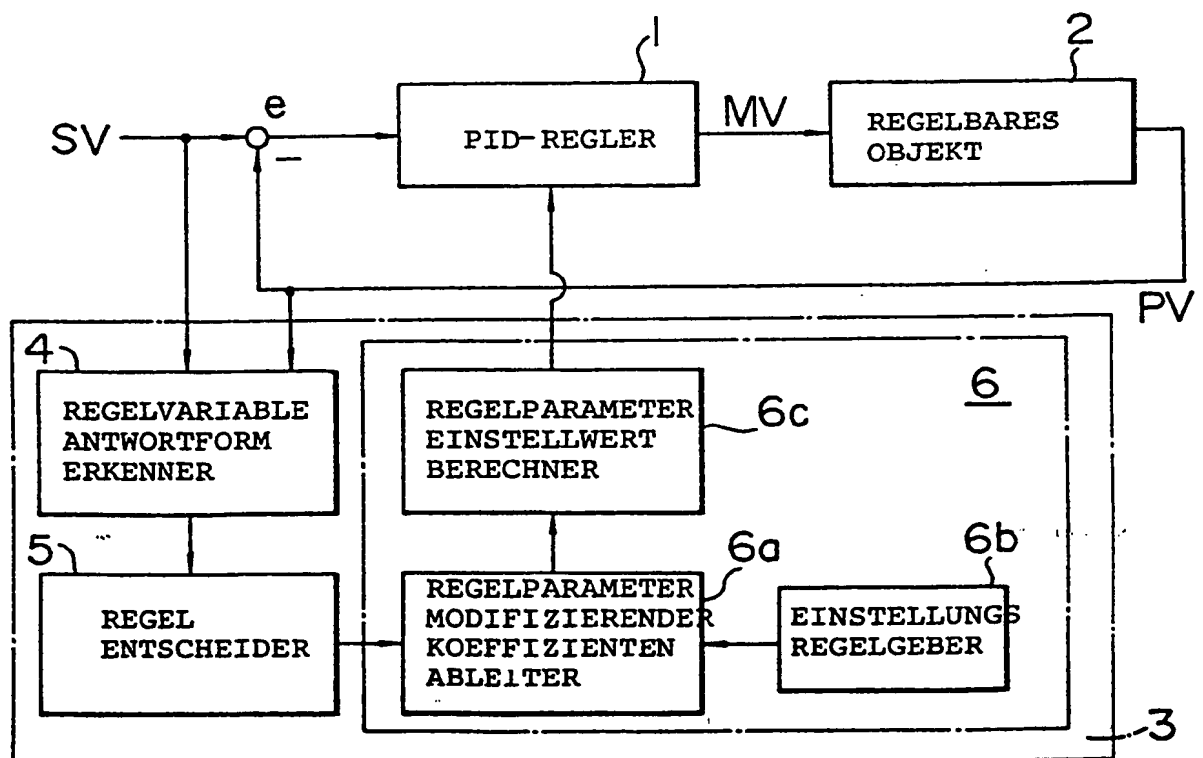


FIG. 4



3811086

FIG. 5A

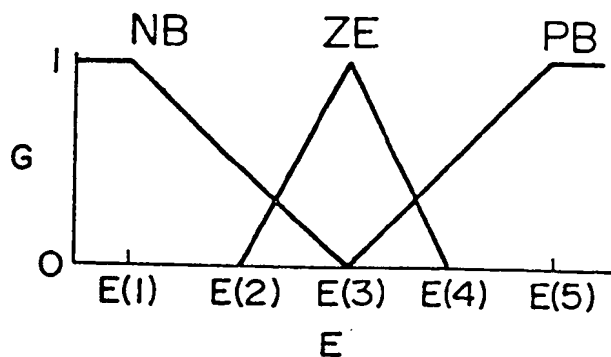


FIG. 5B

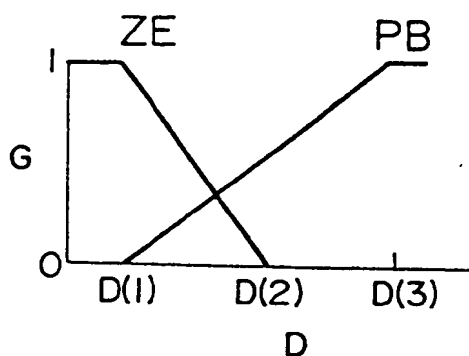
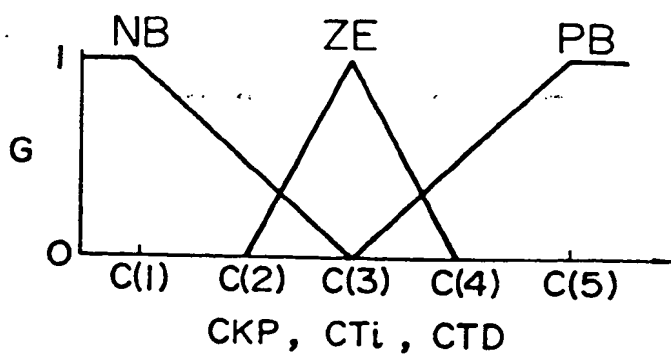


FIG. 6

REGEL	E	D	CKP	CTI	CTD
1	PB	PB	NB	PB	PB
2	PB	ZE	ZE	PB	PB
3	ZE	PB	ZE	ZE	PB
4	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
5	NB	PB	PB	PB	ZE
6	NB	ZE	PB	ZE	NB

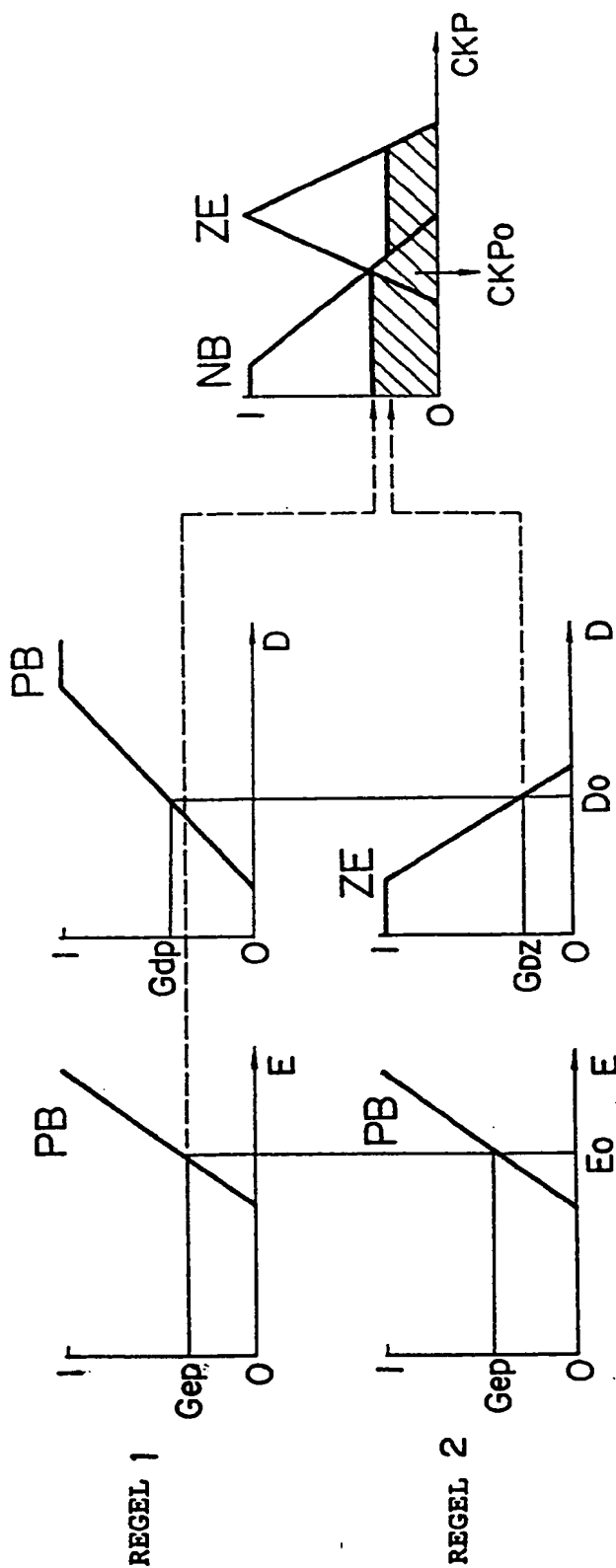
FIG. 7





3811086

FIG. 8



3811086

FIG. 9

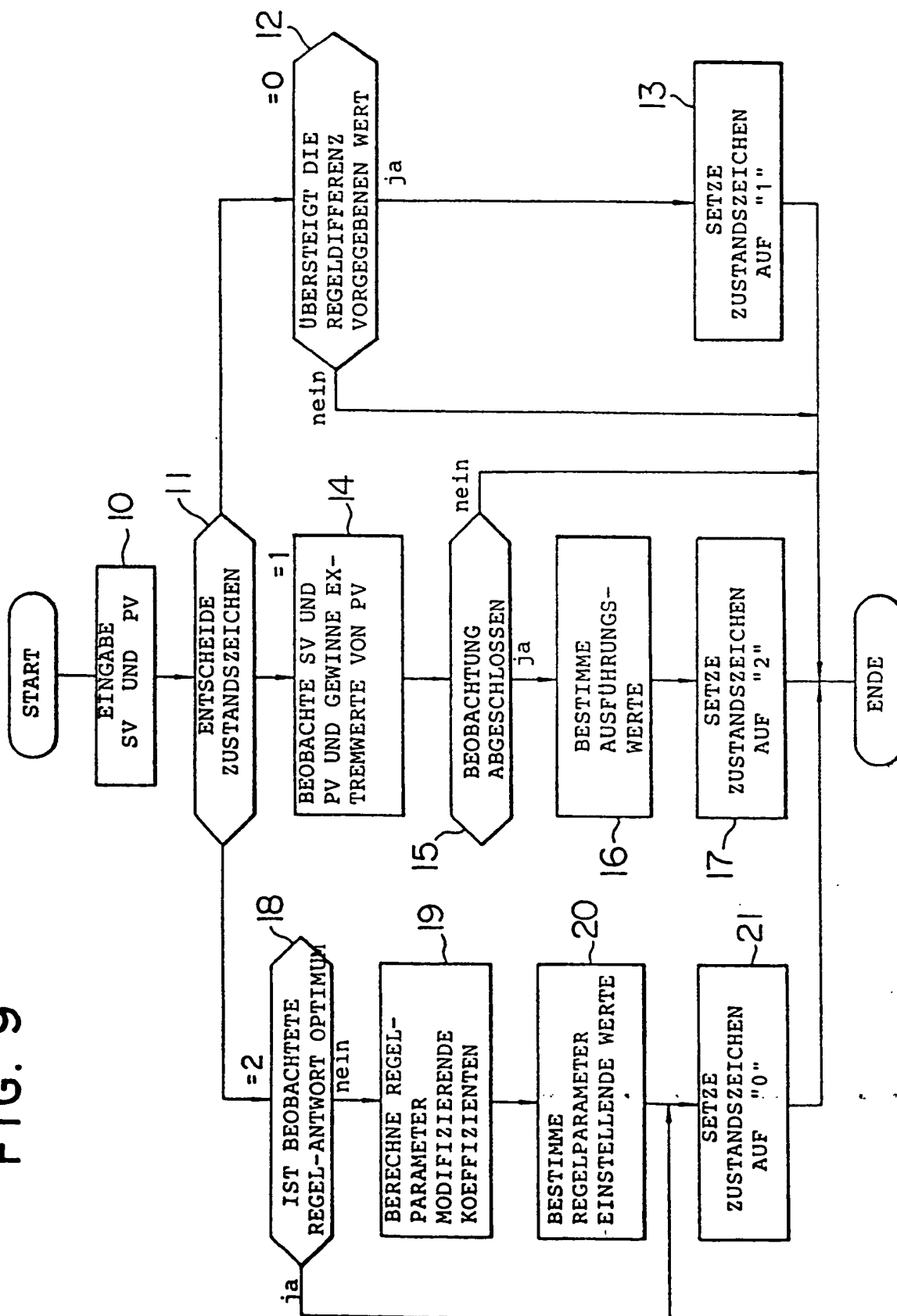


FIG. 10

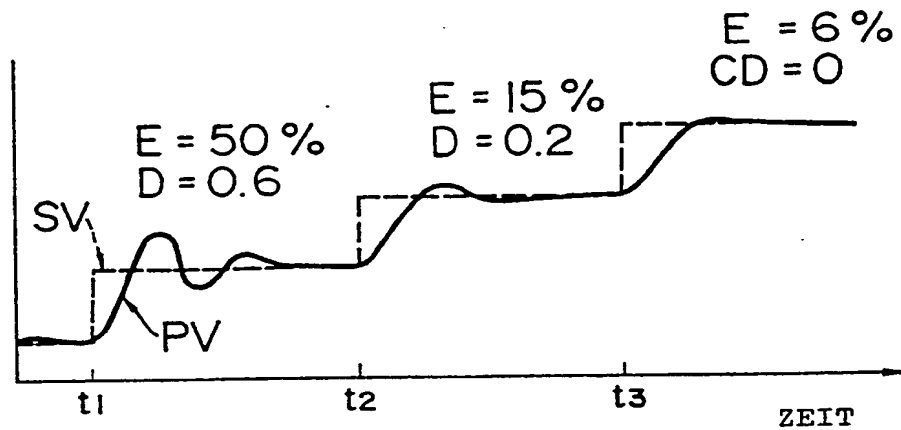
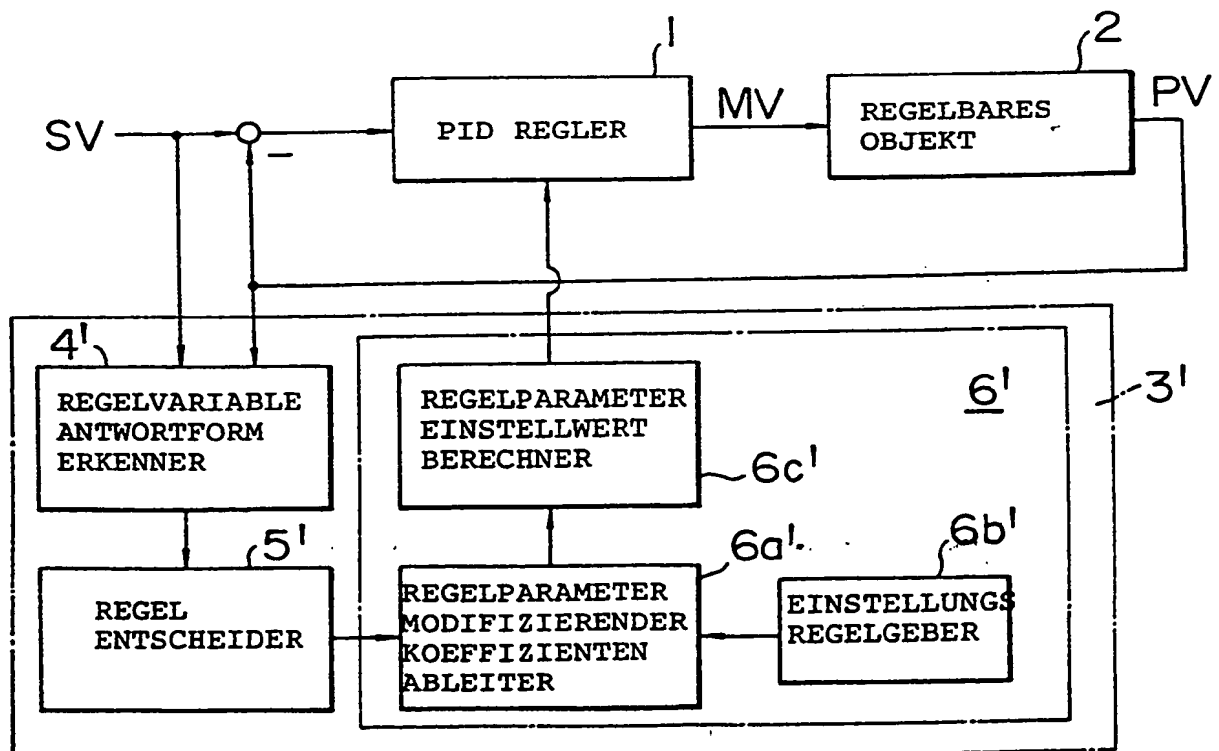


FIG. 11



3811086

FIG. 12A

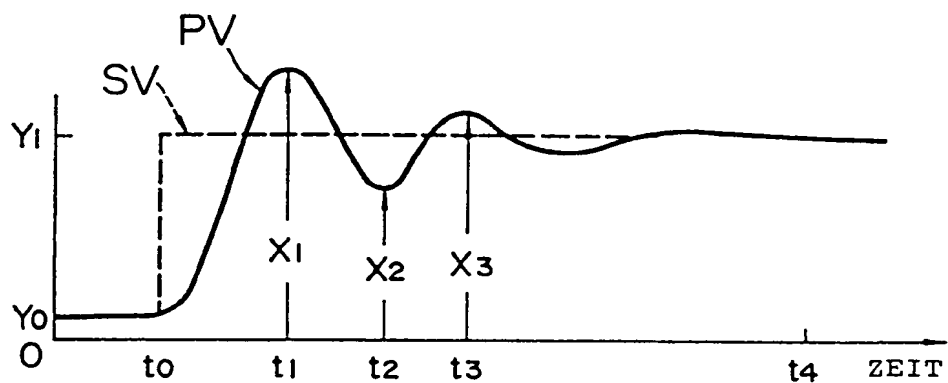


FIG. 12B

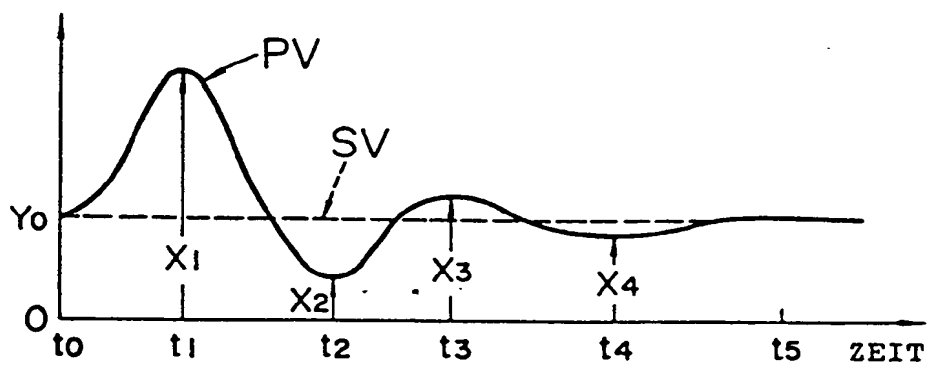


FIG. 13A

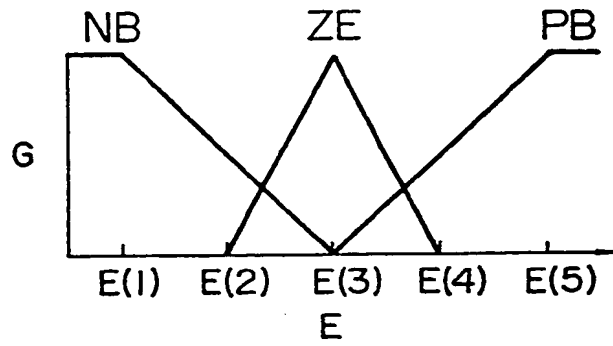


FIG. 13B

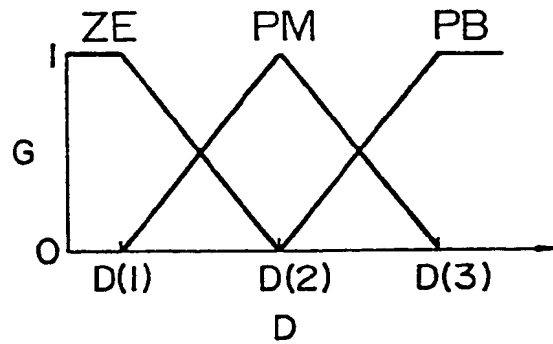
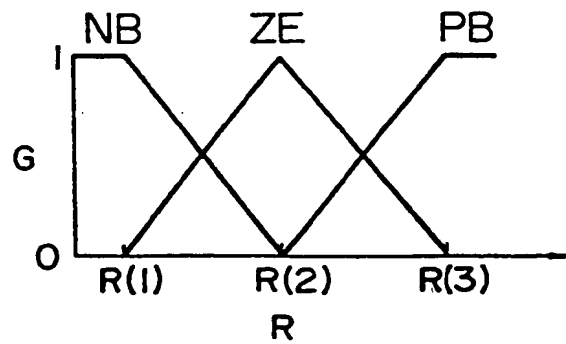


FIG. 13C

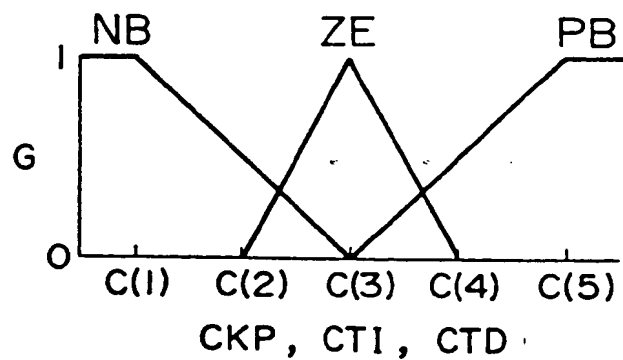


3811086

FIG. 14

REGEL	E	D	R	CKP	CTI	CTD
1	PB	PB		NB	ZE	NB
2	PB	PM	PB	NB	NB	ZE
3	PB	PM	ZE	ZE	ZE	PB
4	PB	PM	NB	PB	PB	PB
5	PB	ZE	PB	NB	ZE	ZE
6	PB	ZE	ZE	ZE	PB	ZE
...						

FIG. 15



82

3811086

FIG. 16

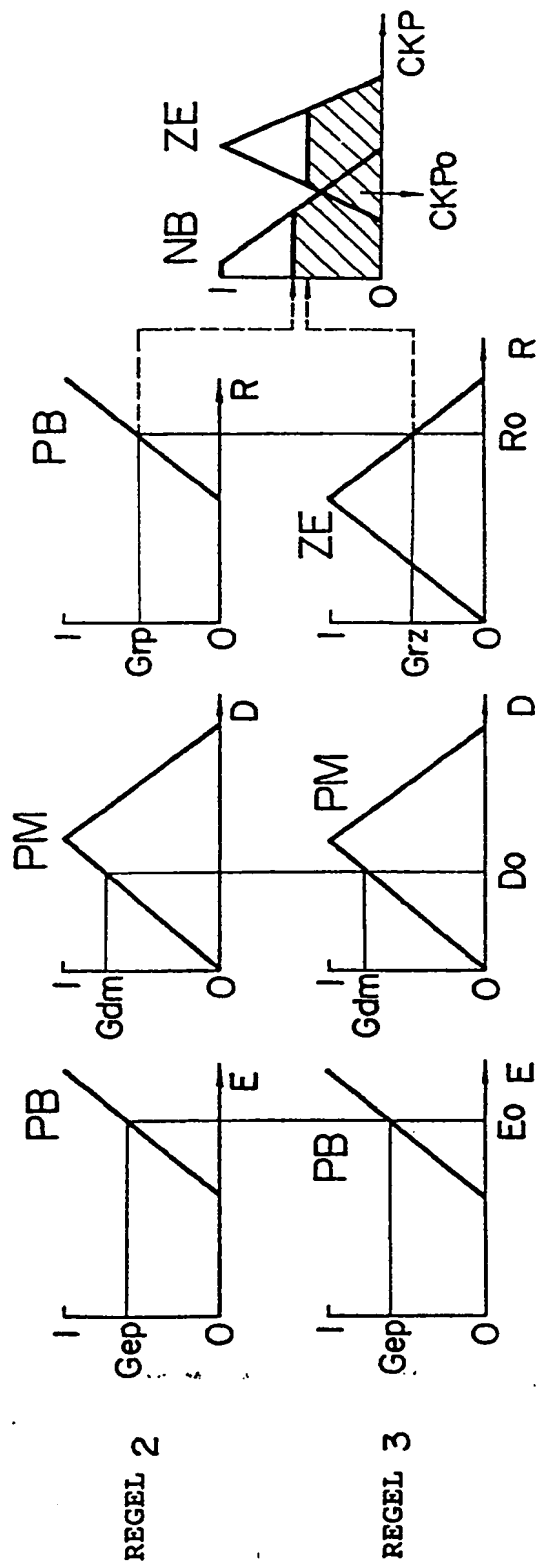
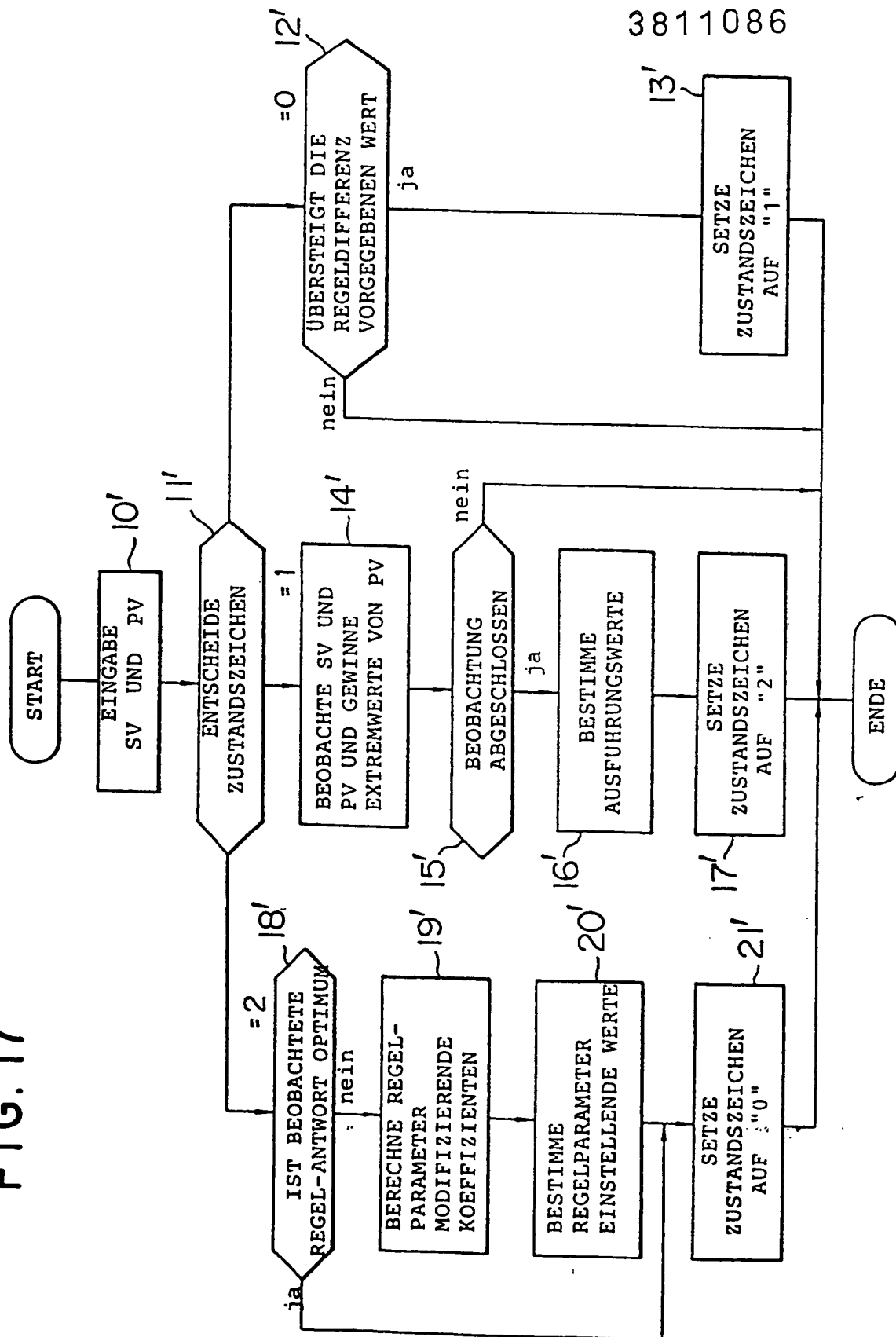


FIG. 17





3811086

FIG. 18A

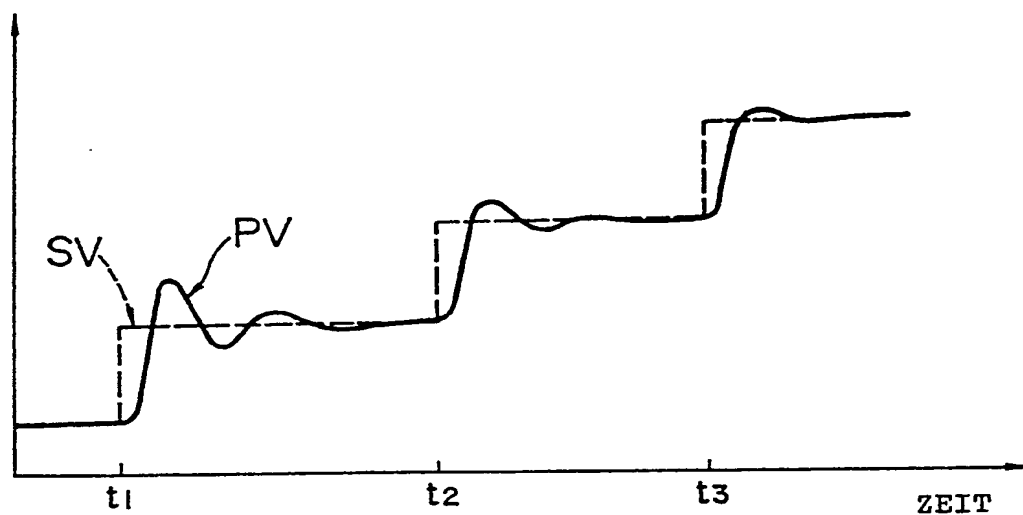


FIG. 18B

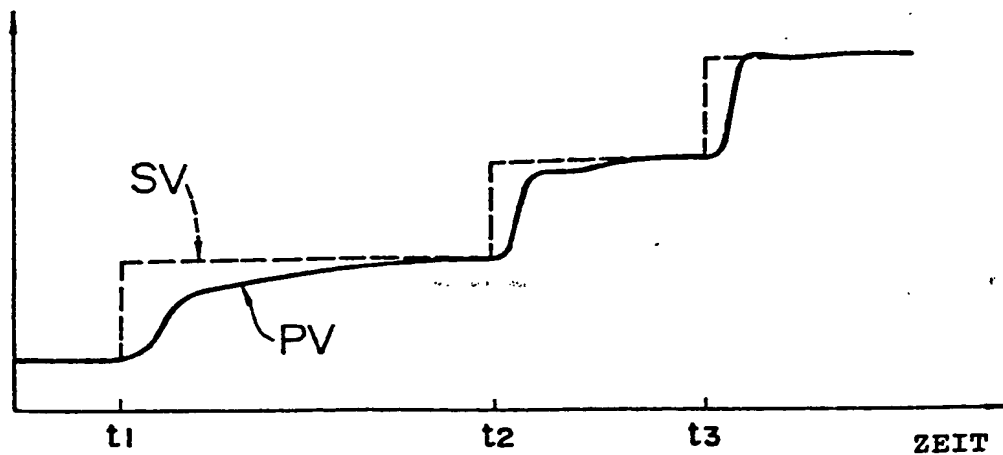
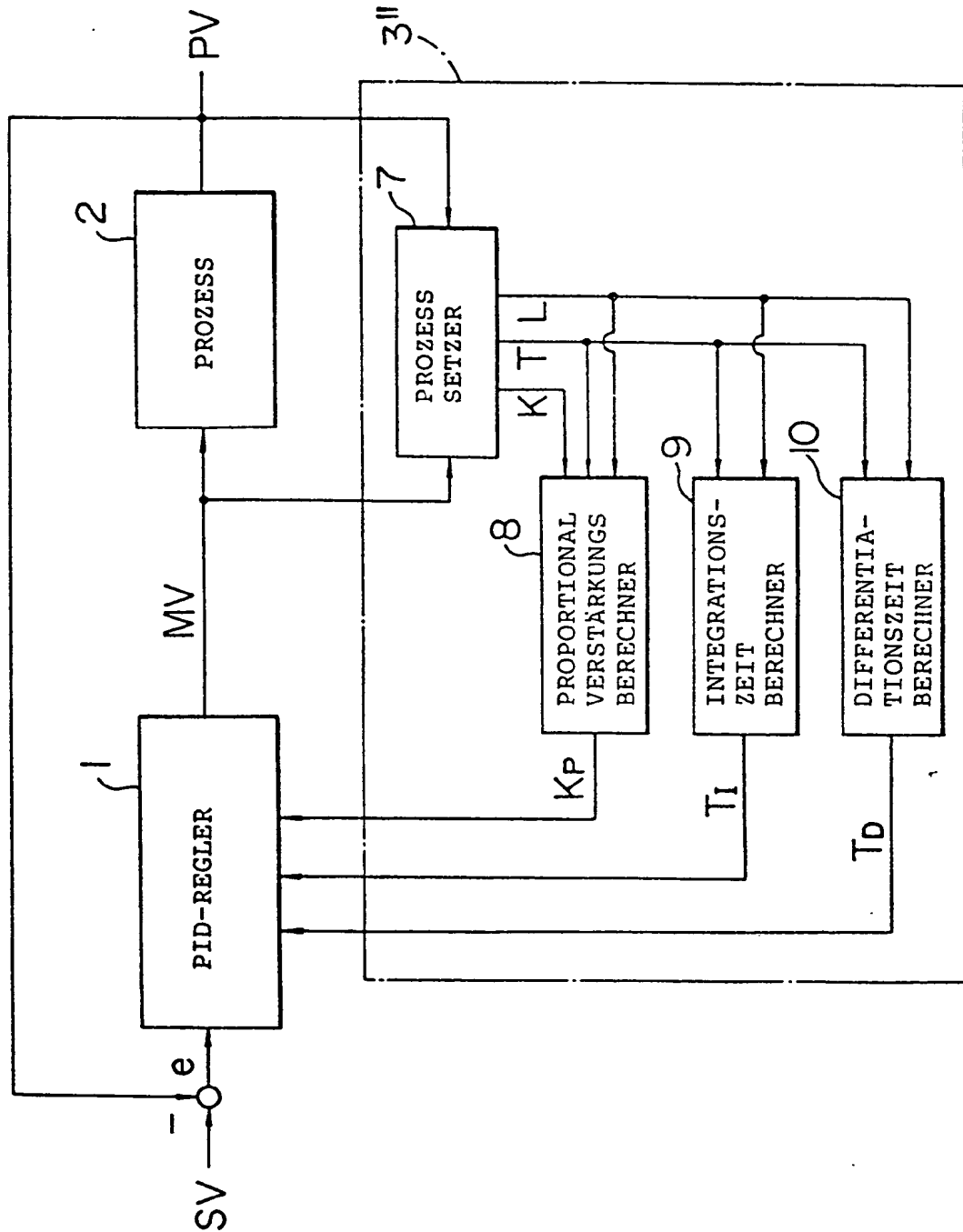


FIG. 19



3811086

45

3811086

FIG. 20

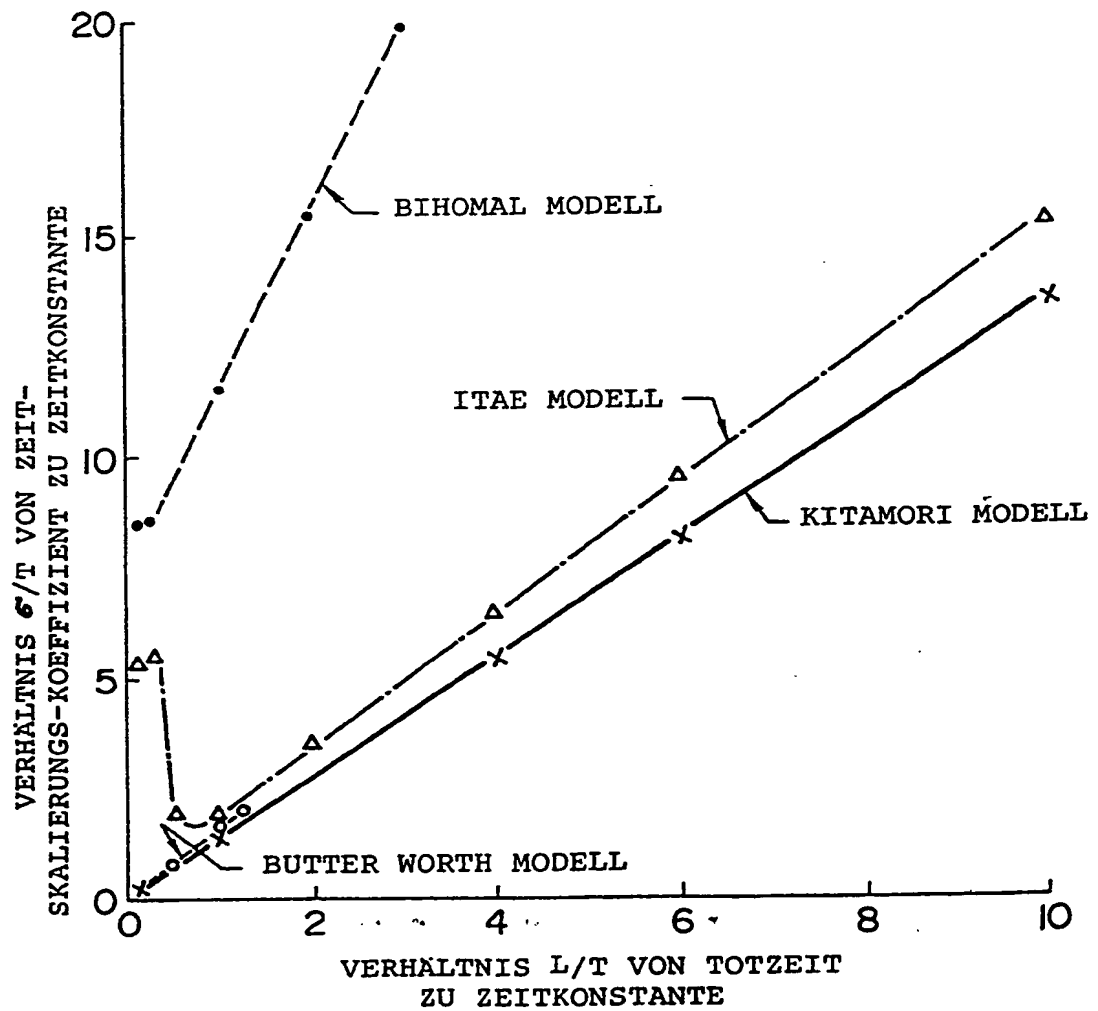


FIG. 2IA

3811086

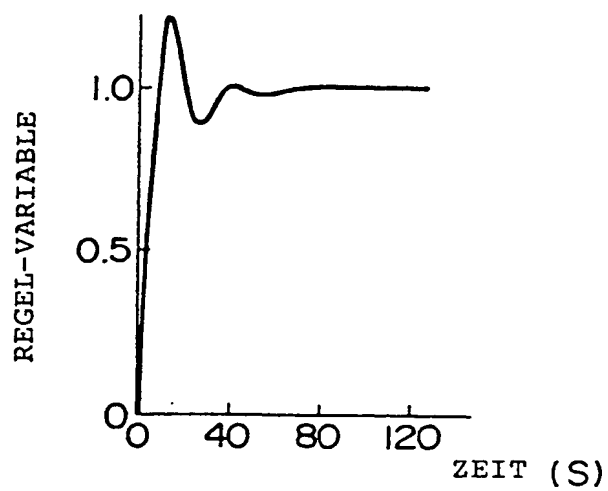


FIG. 2IB

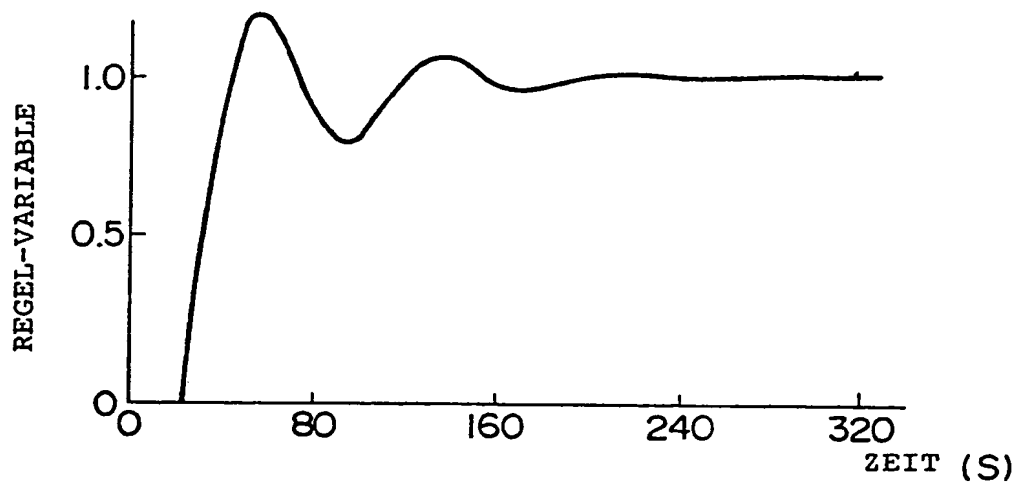
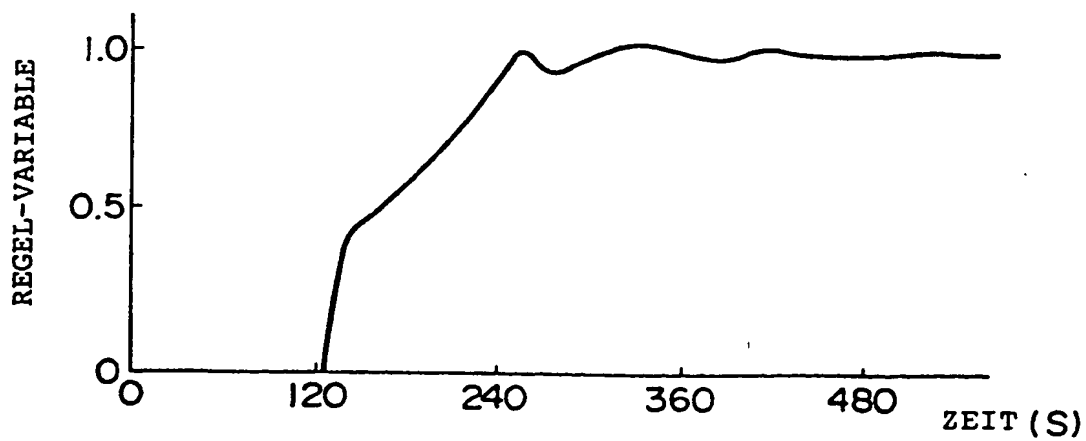


FIG. 2IC



1/9/3

DIALOG(R)File 351:Derwent WPI  
(c) 2002 Thomson Derwent. All rts. reserv.

007666848

WPI Acc No: 1988-300780/ 198843

XRPX Acc No: N88-228289

PID regulator for industrial e.g. chemical process - has automatic tuning facility to set parameters of PID controller

Patent Assignee: HITACHI LTD (HITA )

Inventor: KAWAKAMI J; MATSUMOTO H; SAITO T; SUEHIRO T; TACHIBANA K;

TAKAHASHI S

Number of Countries: 003 Number of Patents: 004

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
DE 3811086	A	19881020	DE 3811086	A	19860331	198843 B
US 4903192	A	19900220				199014
CN 1036278	A	19891011				199031
CN 1026444	C	19941102	CN 88101903	A	19880402	199543

Priority Applications (No Type Date): JP 87237201 A 19870924; JP 8780976 A

19870403; JP 87201733 A 19870814

Patent Details:

Patent No	Kind	Lan	Pg	Main IPC	Filing Notes
DE 3811086	A		27		
CN 1026444	C			G05B-013/02	

Abstract (Basic): DE 3811086 A

The automatic tuning facility is provided for setting the parameters of a PIO controller. The controller responds to the error between a command (SV) and feedback (PD) and provides the function  $G(S)=K_p(1+T_{is}+T_{d.s})$ . The automatic setting unit (3) has a stage (4) that monitors the regulating variables and determines when the error (e) exceeds a predetermined value.

The unit is connected to a processor (5) that determines when the parameters are optimum. A regulating parameter modifying unit (6) is provided that operates on fuzzy logic algorithms.

USE/ADVANTAGE - E.g. for controlling combustion in boiler, temp., pH-neutralisation and flow rate. Provides optimum setting of PID controller parameters.

0/21

Title Terms: PID; REGULATE; INDUSTRIAL; CHEMICAL; PROCESS; AUTOMATIC; TUNE; FACILITY; SET; PARAMETER; PID; CONTROL

Index Terms/Additional Words: PROPORTION; INTEGRAL; DIFFERENTIAL

Derwent Class: T06; X27

International Patent Class (Additional): G05B-011/42; G05B-013/02

File Segment: EPI

Manual Codes (EPI/S-X): T06-A05; X27-G02

THIS PAGE BLANK (USPTO)